



TUGAS AKHIR TF 090362

**STUDI NUMERIK VARIASI SUDUT *INLET DUCT* TERHADAP
KARAKTERISTIK ALIRAN DAN PERPINDAHAN PANAS PADA
HEAT RECOVERY STEAM GENERATOR TIPE VERTIKAL
MENGUNAKAN METODE KOMPUTASI DINAMIKA FLUIDA
DI PT PJB UP GRESIK**

JESSIE IRMAYANTI
NRP 2415.105.007

Dosen Pembimbing
Gunawan Nugroho, ST, MT, PhD
Nur Laila Hamidah, ST, Msc

JURUSAN TEKNIK FISIKA
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2017



TUGAS AKHIR - TF 141581

**STUDI NUMERIK VARIASI SUDUT *INLET DUCT*
TERHADAP KARAKTERISTIK ALIRAN DAN PERPINDAHAN
PANAS PADA *HEAT RECOVERY STEAM GENERATOR* TIPE
VERTIKAL MENGGUNAKAN METODE KOMPUTASI DINAMIKA
FLUIDA DI PT PJB UP GRESIK**

JESSIE IRMAYANTI
NRP. 2415 105 007

Dosen Pembimbing
Gunawan Nugroho, S.T., M.T., Ph.D
Nur Laila Hamidah, S.T., M.Sc.

DEPARTEMEN TEKNIK FISIKA
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2017



FINAL PROJECT - TF 141581

***NUMERICAL STUDY OF INLET DUCT VARIATIONS OF FLUID
CHARACTERISTIC and HEAT TRANSFER AT HEAT RECOVERY
STEAM GENERATOR WITH VERTICAL TYPE USE
COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS IN PT PJB UP GRESIK***

JESSIE IRMAYANTI
NRP. 2415 105 007

Supervisors :
Gunawan Nugroho S.T., M.T., PhD
Nur Laila Hamidah, S.T., M.Sc

***ENGINEERING PHYSICS DEPARTMENT
Faculty of Industrial Technology
Sepuluh Nopember Institute of Technology
Surabaya 2017***

PERNYATAAN BEBAS PLAGIARISME

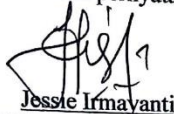
Saya yang bertanda tangan di bawah ini :

Nama : Jessie Irmayanti
NRP : 2415105007
Departemen / Prodi : Teknik Fisika / Lintas Jalur S1 Teknik Fisika
Fakultas : Fakultas Teknologi Industri
Perguruan Tinggi : Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Dengan ini menyatakan bahwa Tugas Akhir dengan judul “Studi Numerik Variasi Sudut *Inlet Duct* Terhadap Karakteristik Aliran Dan Perpindahan Panas Pada *Heat Recovery Steam Generator* Tipe Vertikal Menggunakan Metode Komputasi Dinamika Fluida Di PT PJB UP Gresik” adalah benar-benar karya saya sendiri dan bukan plagiat dari orang lain. Apalagi di kemudian hari terbukti terdapat plagiat pada Tugas Akhir ini, maka saya bersedia untuk menerima sanksi sesuai ketentuan yang berlaku.

Demikian surat pernyataan ini saya buat dengan sebenar-benarnya.

Surabaya, 27 juli 2017
Yang membuat pernyataan,



Jessie Irmayanti

NRP. 2415 105 007

STUDI NUMERIK VARIASI SUDUT *INLET DUCT*
TERHADAP KARAKTERISTIK ALIRAN DAN
PERPINDAHAN PANAS PADA *HEAT RECOVERY STEAM*
GENERATOR TIPE VERTIKAL MENGGUNAKAN
METODE KOMPUTASI DINAMIKA FLUIDA
DI PT. PJB UP GRESIK

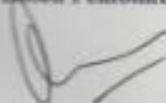
Oleh :



Jessie Irmayanti
NRP. 2415 105 007

Surabaya, 24 Juli 2017

Menyetujui,
Dosen Pembimbing I



Gusawan Nugroho, S.T., M.T, Ph.D
NIP. 19771127 200212 1 002

Menyetujui,
Dosen Pembimbing II

32.



Nur Laila Hamidah, S.T., M.Sc
NIP. 19880710 201504 001

Mengetahui,
Kepala Departemen
Teknik Fisika FT1 – ITS



Agus Muhammad Hatta, S.T, M.Si., Ph.D
NIPN. 19780902 200312 1 002

Halaman ini sengaja dikosongkan

**STUDI NUMERIK VARIASI SUDUT *INLET DUCT*
TERHADAP KARAKTERISTIK ALIRAN DAN
PERPINDAHAN PANAS PADA *HEAT RECOVERY STEAM*
GENERATOR TIPE VERTIKAL MENGGUNAKAN
METODE KOMPUTASI DINAMIKA FLUIDA
DI PT. PJB UP GRESIK**






TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana
Program Studi S-1 Lintas Jalur Teknik Fisika
Departemen Teknik Fisika
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :

Jessie Irmayanti
NRP. 2415105 007

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir

- | | | | |
|---|-----------------------------------|---|-----------------------|
| 1 | Gunawan Nugroho, S.T., M.T., Ph.D |  | (Pembimbing I) |
| 2 | Nur Laila Hamidah, S.T., M.Sc |  | (Pembimbing II) |
| 3 | Dr. Ridho Hantoro, S.T., M.T |  | (Penguji I) |
| 4 | Harsono Hadi, Ph.D |  | (Penguji II) |
| 5 | Hendra Cordova, S.T., M.T |  | (Penguji III) |

**SURABAYA
JULI 2017**

Halaman ini sengaja dikosongkan

**STUDI NUMERIK VARIASI SUDUT *INLET DUCT*
TERHADAP KARAKTERISTIK ALIRAN DAN
PERPINDAHAN PANAS PADA *HEAT RECOVERY STEAM
GENERATOR* TIPE VERTIKAL MENGGUNAKAN
METODE KOMPUTASI DINAMIKA FLUIDA
DI PT. PJB UP GRESIK**

Nama Mahasiswa : Jessie Irmayanti
NRP : 2415105007
Program Studi : S1 Lintas Jalur Teknik Fisika
Jurusan : Teknik Fisika FTI-ITS
Dosen Pembimbing : Gunawan Nugroho, ST, MT, PhD
Nur Laila Hamidah ST, Msc

Abstrak

Salah satu jenis pembangkit di Indonesia adalah *Pembangkit listrik Tenaga Gas Uap*. Untuk meningkatkan efisiensi pada PLTGU yaitu menginstalasi Heat recovery Steam Generator (HRSG) sebagai pengganti boiler. Kinerja HRSG ditentukan oleh kontur aliran *flue gas* saat melewati *heat exchanger*. *Inlet duct* merupakan komponen yang menentukan bentuk aliran pada HRSG. Untuk mengurangi turbulensi gas sisa karena memiliki kecepatan yang tinggi maka aliran yang melewati *inlet duct* harus memiliki kecepatan yang *axial* dan distribusi temperatur yang *uniform*.

Penelitian ini dilakukan menggunakan metode *numerik* dengan *software* ANSYS. Pemodelan yang dilakukan pada penelitian ini adalah dua dimensi, aliran *steady*, dengan menggunakan persamaan *turbulence* standard k- ϵ . *Heat exchanger* didefinisikan sebagai *porous media*. Variasi sudut *inlet duct* yang digunakan yaitu 105^0 , 110^0 , 115^0 , 117^0 , 120^0 dan 125^0 Data-data yang diperlukan diperoleh dari PT PJB UP Gresik.

Dari penelitian yang telah dilakukan didapat beberapa hasil analisa data diantaranya distribusi temperatur akan semakin merata dengan mengecilnya luas penampang dari *inlet duct*. Distribusi temperatur yang tidak *uniform* mulai berkurang pada

heat exchanger superheater 2. HRSG dengan sudut 105° dan sudut 110° lebih cepat mengalami penurunan sebelum memasuki *evaporator HP*. Sedangkan pada hrsg sudut 125° dan sudut 120° memiliki kecepatan aliran yang lebih tinggi hingga melewati *heat exchanger*. Hal itu dikarenakan pengaruh sudut yang diberikan. Semakin besar sudut pada *inlet duct* maka luas penampang dari *inlet duct* juga semakin kecil sehingga kecepatan aliran juga akan tinggi. *Error* yang terjadi pada komponen pada hasil simulasi yaitu sebesar 7%. Hal itu diakibatkan kurang akuratnya simulasi yang dilakukan

Kata kunci : HRSG, *inlet duct*, *Porous media*

**NUMERICAL STUDY OF INLET DUCT VARIATIONS
OF FLUID CHARACTERISTIC and HEAT TRANSFER
AT HEAT RECOVERY STEAM GENERATOR WITH
VERTICAL TYPE USE COMPUTATIONAL FLUID
DYNAMICS IN PT PJB UP GRESIK**

Name : Jessie Irmayanti
NRP : 2415 105 007
Study of Program : S-1 Lintas Jalur Teknik Fisika
Department : Teknik Fisika FTI-ITS
Supervisor : Gunawan Nugroho, ST, MT, PhD
Nur Laila Hamidah ST, Msc

Abstract

One type of power plant in Indonesia is the Steam Gas Power Plant. To improve the efficiency alternative to improve the efficiency of a gas fired power plant is with the installation of an additional form of Heat Recovery Steam Generator as boiler alternate. The performance of HRSG depends on the flue gas velocity contour when through heat exchanger. Inlet duct can form the flue gas velocity contour in hrsg. To reduce the residual gas turbulence because it has a high speed then the flow through the inlet duct must have axial velocity and uniform temperature distribution. This research was conducted using numerical methods with ANSYS FLUENT software. models conducted in this study is two-dimensional, steady flow, with k- ϵ standard turbulence model. Heat exchangers in the HRSG is defined as porous medium and applying heat exchanger models. Angle variation of inlet duct are 105, 115 and 125. The required data is obtained from PT PJB UP Gresik

From the research that has been done it obtain some data analysis results that temperature distribution will be more evenly distributed along with decresing cross-sectional area of inlet duct. Temperature distribution will be more evenly distributed in the Superheater HP 2. Hrsg inlet duct 105 angle has a higher velocity of the flue gas after passing inlet duct but faster decrease before passing superheater so that high speed only

reach in Hp evaporator. Velocity of the flue gas hrsg in inlet duct 125 angle after passing the duct inlet is not as large as the inlet duct of the angle 105, but the speed does not decrease rapidly and can reach the preheater. The backflow affected area and a vortex that occurred in the heat exchanger will be smaller with increasing cross-sectional area of inlet duct. Error on the simulation component ranged from 4% to 10%. The cause of this error due to lack of accurate simulation process.

Key word : HRSG, Inlet duct, Porous media

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kehadiran Allah SWT atas limpahan rahmat dan hidayah-Nya serta shalawat dan salam kepada Nabi Muhammad SAW sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir yang berjudul “**Studi Numerik Variasi Sudut *Inlet Duct* Terhadap Karakteristik Aliran dan Perpindahan Panas Pada *Heat Recovery Steam Generator* Tipe Vertikal Menggunakan Metode Komputasi Dinamika Fluida Di PT. PJB UP Gresik**”

Penulis telah banyak mendapatkan bantuan dari berbagai pihak dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini. Untuk itu penulis mengucapkan terima kasih kepada :

1. Bapak, Ibu dan Adik-adik tercinta yang tanpa lelah memberikan yang terbaik dan selalu memotivasi penulis untuk tetap semangat berusaha dan berdoa
2. Bapak Agus Muhamad Hatta, ST, Msi, Ph.D, selaku Ketua Jurusan Teknik Fisika ITS dan Bapak Hendra Cordova, ST, MT selaku dosen wali penulis yang telah sabar memberikan dukungan, bimbingan, serta ilmu yang sangat bermanfaat.
3. Bapak Gunawan Nugroho, ST.,MT,PhD dan Ibu Nur Laila Hamidah,ST,Msc selaku dosen pembimbing yang senantiasa memberikan motivasi, bimbingan dan arahan dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini.
4. Bapak Eko, Bapak Ageng, Bapak Taufiq selaku pegawai PT PJB UP Gresik yang telah membantu dan membimbing penulis untuk mendapatkan data-data maupun informasi yang dibutuhkan pada tugas akhir
5. Bapak Gunawan Nugroho, ST.,MT,PhD. selaku kepala Laboratorium Rekayasa energi dan pengkondisian lingkungan dan member KSE (Hanif, Aryo, Orin, Tata, dkk) yang telah memberi sarana dan prasarana dan membantu penulis jika mengalami kesulitan dalam pengerjaan tugas akhir

6. Virgananda, ST, yang telah memberikan bantuan, support dan doa kepada penulis
7. Bapak dan Ibu dosen Teknik Fisika yang telah memberikan ilmu selama kuliah.
8. Seluruh Staf Jurusan Teknik Fisika yang telah membantu penulis dalam hal administrasi.
9. Teman-teman seperjuangan dalam mengerjakan Tugas Akhir Simulasi (Rima dan Dian), Teman-teman Ij 2015, Sahabat cewe yang suka makan dan gosip (rachma, dina, novia, nadia, tiara) selalu menghibur dan mendukung penulis
10. Semua pihak yang tidak bisa disebutkan satu persatu, terimakasih.

Penulis menyadari bahwa penulisan laporan Tugas Akhir ini tidaklah sempurna. Oleh karena itu sangat diharapkan kritik dan saran yang membangun dari semua pihak sehingga mencapai sesuatu yang lebih baik lagi. Penulis juga berharap semoga laporan ini dapat menambah wawasan yang bermanfaat bagi pembacanya.

Surabaya, 06 Juni 2017

Penulis.

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
LEMBAR PENGESAHAN.....	iii
ABSTRAK.....	v
KATA PENGANTAR	vii
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR TABEL.....	xv

BAB I. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Permasalahan	3
1.3 Batasan Masalah	4
1.4 Tujuan.....	4
1.5 Manfaat.....	4
1.6 Sistematika Laporan	5

BAB II. TINJAUAN PUSTAKA	7
2.1 HRSG	7
2.2 Bagian Utama HRSG.....	9
2.3 Siklus Gabungan	11
2.4 Siklus Turbin Gas	13
2.5 <i>Inlet Duct</i>	14
2.6 <i>Porous Media</i>	17
2.7 <i>Turbulence Model</i>	18
2.8 Persamaan Turbulensi Model K-epsilon	19
2.8.1 Pemodelan Numerik	20
2.9 Computational Fluid Dynamics.....	20

BAB III. METODOLOGI PENELITIAN.....	23
3.1 Diagram Alir Perancangan Alat.....	23
3.2 Tahap <i>Pre-Processing</i>	26
3.2.1 Pembuatan Geometri	26
3.2.2 <i>Meshing</i>	27
3.3 <i>Processing</i>	28

3.3.1 <i>Energy Equation</i>	28
3.3.2 <i>Pemilihan Turbulence Modelling</i>	28
3.3.3 <i>Operating Condition</i>	29
3.3.4 <i>Cell Zone Condition</i>	30
3.3.5 <i>Boundary Condition</i>	33
3.3.6 <i>Material</i>	34
3.3.7 <i>Initialize</i>	34
3.3.8 <i>Monitor residual</i>	34
3.4 <i>Post-Processing</i>	35
BAB IV. ANALISA DATA	37
4.1 Analisa hasil simulasi	37
4.2 Analisa kontur <i>velocity</i> dengan variasi sudut	38
4.3 Analisa Kontur temperatur dengan variasi sudut.....	44
4.4 Pembahasan	51
BAB V. PENUTUP	55
5.1 Kesimpulan	55
DAFTAR PUSTAKA	57
LAMPIRAN	
BIOGRAFI PENULIS	

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	HRSG	8
Gambar 2.2	Bagian utama HRSG	9
Gambar 2.3	Pembangkit daya siklus gabungan	12
Gambar 2.4	Siklus Turbin Gas Terbuka	13
Gambar 2.5	Siklus Hrsg inlet duct dan zona transisi	14
Gambar 2.6	Sdud-sudut zona transisi inlet duct	15
Gambar 2.7	Grafik logaritmik LMTD	15
Gambar 2.8	Media Berpori	18
Gambar 3.1	Skema diagram alir penelitian Tugas Akhir	23
Gambar 3.2	Geometri HRSG tipe <i>vertical</i>	26
Gambar 3.3	Meshing	28
Gambar 3.4	ilustrasi perhitungan volume total	30
Gambar 4.1	Kontur velocity pada HRSG variasi sudut <i>inlet duct</i> 105, sudut aktual, sudut 125	36
Gambar 4.2	Kontur komponen kecepatan ke arah Y pada koordinat 0,016	37
Gambar 4.3	Vektor kecepatan HRSG variasi sudut <i>inlet duct</i> 105, sudut aktual, sudut 125	38
Gambar 4.4	Grafik Perbandingan kontur kecepatan <i>flue gas</i> sebelum masuk <i>superheater</i>	39
Gambar 4.5	Kontur temperatur pada variasi sudut <i>inlet duct</i> 105, sudut aktual, sudut 125	40
Gambar 4.6	Kontur Temperatur pada penampang (sebelum masuk <i>superheater</i>) pengujian tegangan dari alat yang dibuat	41
Gambar 4.7	Kontur temperatur pada <i>evaporator hp</i> , <i>economizer hp</i> , <i>evaporator lp</i>	42
Gambar 4.8	Kontur temperatur pada <i>economizer lp</i> dan preheater	43
Gambar 4.9	Grafik perbandingan temperatur yang keluar setelah melewati heat exchanger	45

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
LEMBAR PENGESAHAN.....	iii
ABSTRAK.....	v
KATA PENGANTAR	vii
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR TABEL.....	xv
BAB I. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Permasalahan	3
1.3 Batasan Masalah	4
1.4 Tujuan.....	4
1.5 Manfaat.....	4
1.6 Sistematika Laporan	5
BAB II. TINJAUAN PUSTAKA	7
2.1 HRSG	7
2.2 Bagian Utama HRSG.....	9
2.3 Siklus Gabungan	11
2.4 Siklus Turbin Gas	13
2.5 <i>Inlet Duct</i>	14
2.6 <i>Porous Media</i>	17
2.7 <i>Turbulence Model</i>	18
2.8 Persamaan Turbulensi Model K-epsilon	19
2.8.1 Pemodelan Numerik	20
2.9 Computational Fluid Dynamics.....	20
BAB III. METODOLOGI PENELITIAN.....	23
3.1 Diagram Alir Perancangan Alat.....	23
3.2 Tahap <i>Pre-Processing</i>	26
3.2.1 Pembuatan Geometri	26
3.2.2 <i>Meshing</i>	27
3.3 <i>Processing</i>	28

3.3.1 <i>Energy Equation</i>	28
3.3.2 <i>Pemilihan Turbulence Modelling</i>	28
3.3.3 <i>Operating Condition</i>	29
3.3.4 <i>Cell Zone Condition</i>	30
3.3.5 <i>Boundary Condition</i>	33
3.3.6 <i>Material</i>	34
3.3.7 <i>Initialize</i>	34
3.3.8 <i>Monitor residual</i>	34
3.4 <i>Post-Processing</i>	35
BAB IV. ANALISA DATA	37
4.1 Analisa hasil simulasi	37
4.2 Analisa kontur <i>velocity</i> dengan variasi sudut	38
4.3 Analisa Kontur temperatur dengan variasi sudut.....	44
4.4 Pembahasan	51
BAB V. PENUTUP	55
5.1 Kesimpulan	55
DAFTAR PUSTAKA	57
LAMPIRAN	
BIOGRAFI PENULIS	

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pemanfaatan energi dari tahun ke tahun memerlukan perhatian cukup serius karena energi yang tersedia sangat terbatas. Dunia industri merupakan salah satu pengkonsumsi energi atau bahan bakar yang cukup besar dimana dampak yang ditimbulkan diantaranya adalah penggunaan bahan bakar yang tidak efisien dan ramah lingkungan. (Asrori, 2016) Pembangkit Listrik Tenaga Gas dan Uap (PLTGU) adalah gabungan antara PLTG dengan PLTU, dimana panas dari gas buang dari PLTG digunakan untuk menghasilkan uap dan udara yang digunakan sebagai fluida kerja di PLTU. Dan bagian yang digunakan untuk menghasilkan uap tersebut adalah HRSG (Heat Recovery Steam Generator).

PLTGU merupakan suatu instalasi peralatan yang berfungsi untuk mengubah energi panas (hasil pembakaran bahan bakar dan udara) menjadi energi listrik yang bermanfaat. Pada dasarnya, sistem PLTGU ini merupakan penggabungan antara PLTG dan PLTU. Prinsip kerja dari PLTGU adalah mengubah energi thermal yang dimiliki oleh uap (*steam*) dan udara menjadi energi listrik, melalui pemanfaatan air laut untuk menghasilkan *steam* bertekanan yang akan digunakan sebagai penggerak generator untuk menghasilkan listrik dengan media turbin untuk mengubah energi thermal menjadi energi mekanik. Sistem pembakaran sangat diperlukan dalam sistem power plant digunakan untuk menggerakkan komponen seperti gas turbine. Salah satu komponen pada PLTGU adalah *Heat recovery steam generator* atau HRSG. HRSG merupakan komponen yang berfungsi untuk meningkatkan efisiensi dari *power plant* dengan memanfaatkan gas buang (*exhaust*) dari *gas turbine* yang kemudian digunakan untuk kemudian dipanaskan kembali dan digunakan untuk memproduksi uap panas (*Steam*) yang dapat digunakan sebagai penggerak *steam turbine* ataupun digunakan dalam proses lain.

HRSG yang digunakan merupakan tipe HRSG vertika (Asrori, 2016). Terdiri dari komponen-komponen *heat exchanger* berupa *primary superheater*, *secondary superheater*, *evaporator* dan *economizer* yang berada pada posisi horizontal. Komponen lain yang ada pada HRSG salah satunya adalah *duct burner* yang berfungsi untuk menambahkan panas pada gas buang dari *gas turbine* sehingga didapatkan temperatur yang cukup tinggi untuk menghasilkan *steam* pada *heat exchanger*. Kebutuhan penyalan *Duct burner* bergantung dari temperatur gas buang dari *gas turbine* yang menggunakan bahan bakar natural gas. Oleh karena itu melatarbelakangi dibuatnya simulasi variasi sudut pada *inlet duct* untuk mengetahui karakteristik aliran dan perpindahan panas yang terjadi pada HRSG

Penelitian sebelumnya yang telah meneliti HRSG diantaranya: (Veera, 2005) Melakukan simulasi dengan menggunakan *software* CFD FLUENT terhadap HRSG tipe horizontal dan komponen didalamnya menggunakan *software* CFD *Fluent* terhadap HRSG tipe horizontal dan komponen di dalamnya dengan menggunakan *porous media* pada *heat exchanger* dan model simulasi yang digunakan adalah *relizable*. Hasil dari penelitian menunjukkan karakteristik aliran yang terjadi di dalam HRSG pada tipe horizontal, terdapat adanya perbedaan distribusi kecepatan yang tidak merata pada bagian *duct burner*. (Hyuntae. 2012) Melakukan simulasi dengan menggunakan *software* CFD FLUENT terhadap *inlet duct* pada *Heat Recovery Steam Generator* tipe vertikal dengan menggunakan *porous media* pada *heat exchanger* dan model simulasi yang digunakan adalah *RNG K-ε*. (Dhika, 2015) Penelitian ini membahas mengenai pengaruh bentuk bodi seperti *enlargement*, *contraction*, dan *elbow* pada ducting di HRSG. Hasil dari penelitian ini memiliki pengaruh yang sangat besar terhadap distribusi temperatur, tekanan, dan kecepatan pada HRSG. (Bayu kusuma. 2016), Pada penelitian ini memvariasikan dimensi inlet duct dengan membandingkan tiga inlet duct dengan

dimensi yang berbeda-beda menggunakan software GAMBIT 2.4.6. Hasil dari penelitian ini adalah dengan penambahan panjang *inlet duct* akan memberikan hasil yang baik terhadap RMS dan nilai heat transfer yang paling baik yaitu dengan nilai total Q: 303, 332 MW.

(Hedge, 2007) Penelitian dengan memodifikasi konfigurasi internal yang membuat aliran *gas combustion* lebih seragam. (Lee B kwon, 2002) penelitian ini meneliti efek dari aliran *swirl* pada *exhaust gas turbine* pada *inlet duct* pada HRSG tipe horizontal. Hasil dari penelitian yaitu aliran dapat seragam jika terpasang *flow correction device*. (Hyuntae Shin, 2012) Pada penelitian ini memvariasikan sudut dari zona transisi dari *inlet duct* menggunakan simulasi numerik dengan RNG Model k- ϵ untuk menganalisa pola aliran dan mengetahui aliran yang *uniform* di zona transisi dengan menggunakan metode RMS. Hasil dari penelitian ini yaitu aliran yang *uniform* mengakibatkan perpindahan panas yang lebih besar dan sudut yang semakin kecil yaitu 30° mengakibatkan penurunan kecepatan aliran. HRSG yang mengalami peningkatan kapasitas membuat aliran *flue gas* kurang optimal sehingga diperlukan penelitian untuk mendapatkan aliran *flue gas* yang *uniform* setelah melewati *inlet duct*. Pada penelitian tugas akhir ini memvariasikan sudut pada *inlet duct* untuk mendapatkan tujuan tersebut

1.2 Rumusan Permasalahan

Berdasarkan latar belakang yang telah dijelaskan diatas, maka perumusan masalah yang akan diangkat untuk mengarahkan penelitian Tugas Akhir ini yaitu:

1. Bagaimana pengaruh variasi sudut pada *inlet duct* terhadap karakteristik aliran dari *flue gas* ?
2. Bagaimana pengaruh variasi sudut pada *inlet duct* terhadap performansi perpindahan panas pada HRSG di PT PJB UP Gresik

1.3 Batasan Masalah

Untuk memfokuskan penyelesaian masalah pada penelitian tugas akhir ini maka batasan masalah yang diangkat adalah sebagai berikut :

1. Geometri HRSG yang digunakan mengacu pada geometri HRSG di PT PJB UP Gresik yaitu tipe vertikal
2. Variable yang divariasikan yaitu Sudut pada *inlet duct*. Dengan sudut β 105^0 , 110^0 , 115^0 , 117^0 , 120^0 , dan 125^0 dan sudut α diasumsikan sama.
3. Modul Heat Exchanger pada HRSG di asumsikan sebagai porous media
4. Simulasi yang digunakan dalam tugas akhir ini yaitu *Computational Fluid Dynamic* (CFD)

1.4 Tujuan

Tujuan utama dari tugas akhir ini yaitu :

1. Mengetahui karakteristik aliran dari *flue gas* setelah dilakukan variasi sudut di *inlet duct* pada HRSG
2. Mengetahui pengaruh variasi sudut pada *inlet duct* terhadap performansi perpindahan panas pada HRSG

1.5 Manfaat

Pada penelitian tugas akhir ini diharapkan akan menambah wawasan ilmu pengetahuan mahasiswa secara umum dan khususnya bagi penulis dalam mensimulasikan HRSG dengan menggunakan *software* fluent. Selain itu tugas akhir ini dapat dijadikan referensi pemodelan yang dibangun di PT. PJB UP Gresik dan literatur bagi mahasiswa maupun pembaca dalam kegiatan penelitian tugas akhir.

1.6 Sistematika Laporan

Adapun sistematik penulisan tugas akhir ini adalah sebagai berikut :

Bab I Pendahuluan

Bab I berisi tentang penjelasan singkat latar belakang diadakannya penelitian tugas akhir beserta referensi dari

penelitian-penelitian sebelumnya. Kemudian rumusan masalah berisi pertanyaan-pertanyaan yang akan menjadi penentu apa bahasan yang akan dilakukan dalam penelitian tersebut. Menentukan batasan masalah, menjelaskan tujuan dan manfaat penelitian, dan sistematika laporan tugas akhir

Bab II Tinjauan Pustaka

Berisi tentang dipelajari diantaranya bentuk umum dari HRSG, karakteristik fluida dalam HRSG, siklus PLTGU, prinsip perpindahan panas pada HRSG, *porous media* metode *computational fluid dynamics* (CFD) yang digunakan untuk menganalisa hasil simulasi

Bab III Metodologi

Bab ini berisi langkah-langkah penelitian yang dilakukan. meliputi *pre processing*, *processing* dan *post processing* yang dilakukan menggunakan *software* gambit 2.4.6 dan FLUENT 6.3.26

Bab IV Analisa Dan Pembahasan

Setelah serangkaian penelitian dilakukan kemudian didapatkan hasil-hasil numerik kualitatif dan kuantitatif dari *post processing* yaitu berupa distribusi temperatur, distribusi kecepatan, tekanan dan grafik dari perangkat lunak *Ansys* 6.3.26 kemudian hasil tersebut dianalisa

Bab V Kesimpulan

Pada bab ini dilakukan penarikan kesimpulan sesuai dengan hasil analisa data yang telah didapatkan dan saran yang perlu diberikan

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 HRSG (*Heat Recovery Steam Generator*)

Ketel uap atau boiler merupakan sebuah alat penukar panas yang memanfaatkan gas buang dari turbin gas (*gass turbine*) yang masih sangat panas (sekitar 500°C) sebagai sumber energi atau sebagai sumber panas untuk menghasilkan uap (*steam*), baik uap bertekanan tinggi (*HP Steam*) maupun uap bertekanan rendah (*LP Steam*)(Sitepu, 2010). Didalam HRSG terdapat tabung-tabung pipa (*tube*) yang dialiri uap maupun air, dan permukaan luar tabung-tabung tersebut dialirkan atau dikenakan dengan gas panas dari gas buang turbin gas untuk memanaskan air maupun uap didalam pipa. Karena memanfaatkan energi gas buang sebagai sumber panas, maka HRSG tidak memerlukan bahan bakar untuk men, sehingga HRSG membuat PLTGU menjadi pembangkit yang relatif efisien disbanding dengan PLTG maupun PLTU. HRSG memiliki peran yang sangat penting dalam sebuah system pembangkit PLTGU, karena HRSG merupakan instrument pertama dalam siklus uap, sehingga sangat menentukan terjadinya siklus kombinasi (*combine cycle*) dalam siklus PLTGU. Pada PT PJB UP gresik, terdapat 9 unit HRSG yntag terbagi dalam tiga blok, yaitu Blok I, Blok II, dan Blok III yang masing-masing memiliki 3 unit HRSG. HRSG akan mulai beroperasi ketika damper pada exhaust dari gas turbin yang semula menutup pada jalur inlet HRSG beralih menutup jalur pada bypass stack. Pemindah panas dalam *HRSG* terjadi dalam proses :

- a. Radiasi di ruang bakar
- b. Konveksi di *Economizer* dan *Air Heater*
- c. Kombinasi radiasi dan konveksi di *Superheater* dan *Reheater*



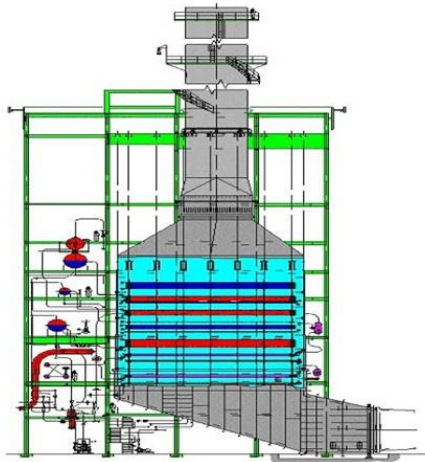
Gambar 2.1 HRSG(Asrori, 2016)

Pada umumnya HRSG tidak dilengkapi pembakar (burner) dan tidak mengkonsumsi bahan bakar, sehingga tidak terjadi proses perpindahan/penyerapan panas radiasi. Proses perpindahan/penyerapan yang terjadi hanyalah proses konveksi dan konduksi dari gas buang turbin gas ke dalam air yang akan diproses menjadi uap melalui elemen-elemen pemanas didalam ruang boiler HRSG. HRSG sangat bermanfaat untuk meningkatkan hasil guna (efisiensi) bahan bakar yang dipakai pada unit turbin gas, yang selanjutnya akan menggerakkan unit turbin uap. Sistem pembangkit listrik yang memanfaatkan proses ini yaitu PLTGU (Pusat listrik tenaga gas dan uap). HRSG adalah bagian penting PLTGU, dimana unit pembangkit PLTGU disebut juga Blok PLTGU (Sitepu, 2014)

Kapasitas produksi uap yang dapat dihasilkan HRSG tergantung pada kapasitas energi panas yang masih mengandung gas buang dari unit turbin gas yang berarti masih tergantung pada beban unit turbin gas. Pada dasarnya turbin gas yang beroperasi pada putaran tetap, aliran udara masuk kompressor juga tetap, perubahan beban turbin yang tidak konstan dengan aliran bahan bakar tetap, sehingga suhu gas buang juga berubah mengikuti perubahan turbin gas.

2.2 Bagian Utama *Heat Recovery Steam Generator*

Heat Recovery Steam Generator terdiri dari beberapa bagian elemen yaitu pemanas awal kondensat (kondensat preheater), ekonomiser, evaporator, dan superheater yang masing-masing memiliki fungsi yang berbeda. Pada sub bab ini akan membahas fungsi masing-masing elemen pada Heat Recovery Steam Generator.



Gambar 2.2 Bagian Utama HRSG Yaitu *Superheater*, *Evaporator* dan *Economizer* (Asrori, 2016)

Heat Recovery Steam Generator terdiri dari beberapa bagian elemen yaitu pemanas awal kondensat (kondensat preheater), ekonomiser, evaporator, dan superheater yang masing-masing memiliki fungsi yang berbeda. Pada sub bab ini akan membahas fungsi masing-masing elemen pada Heat Recovery Steam Generator (Sugiharto, 2010).

1. Pemanas awal kondensat (condensate preheater atau CPH)

Pemanas awal kondensat berfungsi memanaskan air yang berasal dari kondensat keluaran turbin uap, kemudian air yang sudah dipanaskan ini dialirkan dan dikumpulkan ke tangki air umpan. Umumnya pemanas awal kondensat ini

diletakkan di bagian paling atas sekali dari posisi pipa – pipa pemanas yang ada dan diikuti oleh pipa – pipa lainnya.

2. Ekonomiser

Ekonomiser terdiri dari pipa-pipa air yang ditempatkan pada lintasan gas asap setelah pipa-pipa evaporator. Pipa-pipa ekonomiser dibuat dari bahan baja atau besi tuang yang sanggup untuk menahan panas dan tekanan tinggi. Ekonomiser berfungsi untuk memanaskan air pengisi sebelum memasuki steam drum dan evaporator sehingga proses penguapan lebih ringan dengan memanfaatkan gas buang dari HRSG yang masih tinggi sehingga memperbesar efisiensi HRSG karena dapat memperkecil kerugian panas pada HRSG tersebut. Air yang masuk pada evaporator sudah pada temperatur tinggi sehingga pipa - pipa evaporator tidak mudah rusak karena perbedaan temperatur tidak terlalu tinggi.

3. Evaporator

Evaporator merupakan elemen HRSG yang berfungsi untuk mengubah air hingga menjadi uap jenuh. Pada evaporator dengan adanya pipa – pipa penguap akan terjadi pembentukan uap. Biasanya pada evaporator kualitas uap sudah mencapai 0,8 – 0,98 sehingga sebagian masih berbentuk fase cair. Evaporator akan memanaskan uap air yang turun dari drum uap panas lanjut yang masih dalam fase cair agar berbentuk uap sehingga bisa diteruskan menuju superheater. Perpindahan panas yang terjadi pada evaporator adalah *film pool boiling*, dimana air yang dipanaskan mendidih sehingga mengalami perubahan fase menjadi uap jenuh. Jenis evaporator ada 2 (dua) jenis yaitu evaporator bersikulasi alami (bebas) dan evaporator bersikulasi paksa (dengan pompa).

4. Superheater

Superheater merupakan alat yang berfungsi untuk menaikkan temperatur uap jenuh sampai menjadi uap panas lanjut (*superheater vapour*). Uap lanjut bila

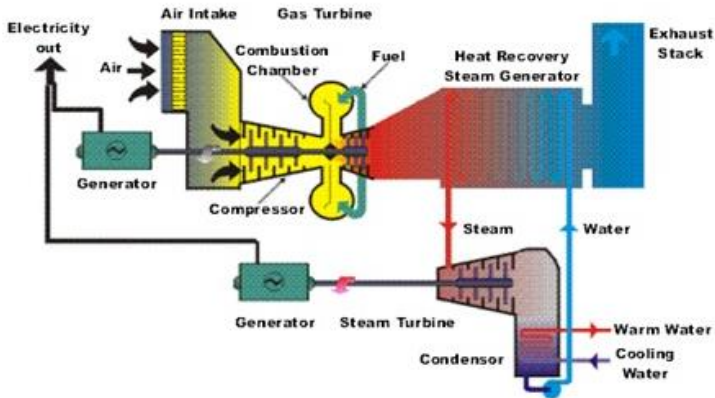
digunakan untuk melakukan kerja dengan jalan ekspansi didalam turbin atau mesin uap tidak akan mengembun, sehingga mengurangi kemungkinan timbulnya bahaya yang disebabkan terjadinya pukulan balik (*back stroke*) yang diakibatkan mengembunnya uap belum pada waktunya sehingga menimbulkan vakum ditempat yang tidak semestinya di daerah ekspansi. Selain komponen – komponen utama HRSG di atas, HRSG juga dilengkapi peralatan bantu lainnya yang fungsinya sangat menunjang kinerja HRSG, antara lain: Drum uap Sebagai wadah yang berfungsi memisahkan campuran air – uap dan keluarannya berupa uap jenuh kering (*saturated steam*), yang kemudian dialirkan ke superheater.

5. Cerobong asap

Sebagai laluan yang membantu tarikan gas buang ke atmosfer. Cerobong asap terdiri dari diffuser, diverter dan silencer.

2.3 Siklus Gabungan (Combine Cycle)

(Galang, 2014) Siklus gabungan adalah suatu siklus yang memanfaatkan gas buang dari turbin gas (PLTGU) untuk memanaskan air dalam ketel, dengan menggunakan heat exchanger berupa HRSG dan uap yang dihasilkan HRSG tersebut digunakan untuk menggerakkan generator listrik. Gas turbin dari turbin gas keluar pada umumnya 500°C. Disebabkan tekanan rendah, suhu tinggi (entalpi tinggi) ini, gas buang tidak dapat dimanfaatkan menjadi fluida kerja.



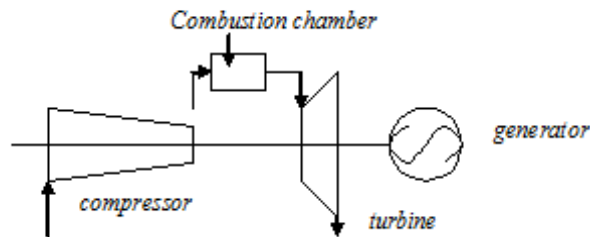
Gambar 2.3 *Combine cycle* (Rakhman, 2013)

Pembangkitan daya seperti gambar 2.3 diatas, disamping menghasilkan efisiensi yang tinggi dan keluaran daya yang lebih besar siklus gabungan bersifat flexibel, mudah dinyalakan dengan beban tak penuh, cocok untuk operasi beban.besar dan turbin bersiklus mempunyai efisiensi dalam daerah beban yang luas. Kelemahannya berkaitan dengan karena pada dasarnya instalasi ini menggabungkan dua teknologi didalam satu kompleks pembangkit daya.

2.4 Siklus Turbin Gas

(Muchsin, 2014) Turbin gas merupakan alat yang mengkonversi energi kimia bahan bakar menjadi energi mekanis melalui proses pembakaran, kemudian energi mekanis tersebut dikonversi oleh generator menjadi energi listrik. Prinsip kerja sistem ini adalah udara atmosfer masuk ke dalam kompresor yang berfungsi menghisap dan menaikkan tekanan udara tersebut, sehingga temperaturnya naik. Kemudian udara bertekanan tinggi itu masuk ke dalam ruang bakar. Di dalam ruang bakar disemprotkan bahan bakar ke dalam arus udara tersebut, sehingga terjadi proses pembakaran. Proses pembakaran tersebut berlangsung pada tekanan konstan, sehingga bisa dikatakan bahwa ruang bakar hanyalah digunakan

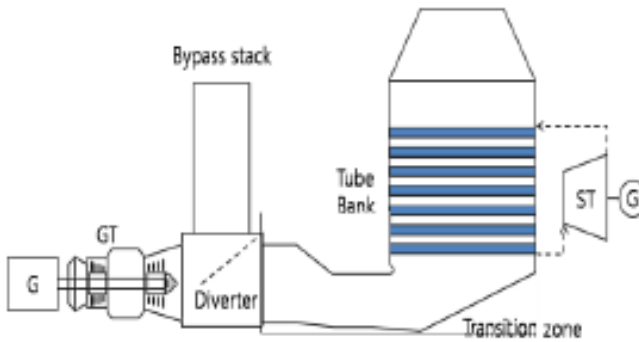
untuk menaikkan temperatur udara. Gas pembakaran yang bertemperatur tinggi itu kemudian masuk ke dalam turbin gas dimana energinya dipergunakan untuk memutar sudu turbin $\pm 60\%$ dari daya yang dihasilkan turbin untuk memutar kompresornya sendiri, sisanya baru digunakan untuk memutar generator. Siklus ideal ini terdiri dari 2 proses isobar yang terjadi diruang bakar dan proses pembuangan gas bekas, serta 2 proses isentropik yang terjadi pada kompresor dan ekspansi gas pada turbin



Gambar 2.4 Siklus Turbin Gas Terbuka (Shanti, 2012)

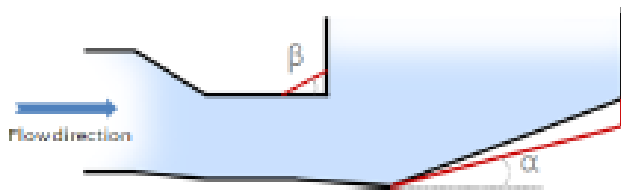
2.5 Inlet Duct

(Wardhana, 2014) *Inlet duct* merupakan bagian yang menentukan bentuk aliran dari HRSG. *Inlet duct* ini terhubung ke gas turbin *exhaust flange* dan menyalurkan *flue gas* ke permukaan pemanasan awal. Tujuan dari desain *inlet duct* yaitu agar memiliki kecepatan dan distribusi temperatur yang *uniform* karena hal tersebut dapat mengoptimalkan pressure drop dan mengurangi turbulensi gas sisa karena memiliki kecepatan tinggi. Pada inlet duct terdapat zona transisi seperti pada gambar di bawah ini



Gambar 2.5 Siklus HRSG, *Inlet duct* dan Zona Transisi (Shin, 2012)

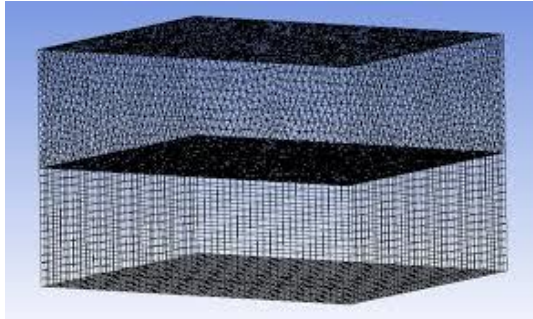
Dimana zona tersebut memiliki wilayah ekspansi untuk mengurangi kecepatan aliran dan memungkinkan terjadinya perpindahan panas yang cukup besar. Pada tugas akhir ini akan dilakukan studi kasus pengaruh sudut *inlet duct* untuk mengetahui karakteristik pola aliran gas buang. Pada Tugas akhir ini memvariasikan sudut 105° , 115° , dan 125° .



Gambar 2.6 Sudut-sudut Zona Transisi *inlet duct* (Shin, 2012)

2.6 Porous Media

(Galang, 2014) Porous Media adalah suatu pemodelan volume yang dapat difungsikan selayaknya sebuah Heat Exchanger yang mempengaruhi kondisi aliran yang melewatinya.



Gambar 2.8 Media Berpori (Galang, 2014)

Penelitian yang dilakukan oleh (Darcy 1856), bahwa fluida yang melewati *porous media* yang pada awalnya memasuki tube, memiliki *velocity profile* yang normal dan dipengaruhi oleh gesekan dari dinding. Kemudian setelah melewati *porous media*, *velocity profile* dari aliran berubah menjadi seragam.

2.7 Turbulence Model (Wardhana, 2014)

A. Spallart-Almaras

Persamaan single transport untuk menyelesaikan *modified turbulent viscosity* secara langsung. Didesain secara spesifik untuk aliran yang terikat dengan wall dan memiliki *mesh* yang baik disekitar wall. Model ini cocok untuk *imeshing* dengan ukuran yang besar. tidak maksimal untuk mensimulasi aliran 3D yang bebas tegangan geser dan separasi yang kuat.

B. Standard k-ε

Berdasar dari persamaan *two transport* dengan menggunakan k dan ε . Model ini dapat menyelesaikan kasus *viscous heating*, *compressibility* yang dapat diselesaikan model k-ε lainnya. Hanya valid untuk aliran yang *fully turbulent*. Kinerja buruk untuk aliran kompleks yang meliputi separasi dan *strong stream line curvature*

C. RNG K- ϵ

Salah satu dari variasi k- ϵ . Persamaan dan koefisien diturunkan secara analitis. Baik digunakan untuk *highly strained flows*, memprediksi *swirling*, dan aliran dengan bilangan reynolds yang rendah

D. Realizable K- ϵ

Variasi dari pemodelan k- ϵ , variasi ini memungkinkan menentang konstrain matematis sehingga dapat meningkatkan performa dari pemodelan ini. Model ini lebih akurat dan lebih mudah konvergen dibanding RNG

E. Standard k- ω

Model persamaan *two transport* dengan menggunakan k dan ω . Menunjukkan hasil yang sangat baik untuk aliran dengan bilangan reynolds yang rendah dan aliran yang terikat oleh wall. Model ini juga cocok untuk *transitional*, *free shear*, dan *compressible flows*

F. RSM (Reynolds Stress Model)

Merupakan model yang paling teliti dari *fluent*. Model ini melakukan kalkulasi tanpa menggunakan asumsi *isotropic viscosity*. Model ini lebih sulit untuk konvergen karena menyertakan persamaan-persamaan tambahan. Sangat baik untuk aliran 3D kompleks dengan *strong streamline curvature* dan *strong swirl*. (Wardhana, 2014)

2.8 Persamaan Turbulensi Model K-Epsilon

K-Epsilon merupakan salah satu jenis permodelan turbulensi yang sering digunakan. Model ini menambahkan dua buah persamaan transport untuk memodelkan suatu turbulensi, variabel pertama adalah energi kinetik turbulen (k) dan variabel kedua adalah disipasi turbulensi (ϵ). Nilai k menunjukkan jumlah energi dalam turbulensi sedangkan nilai ϵ menunjukkan ukuran dari turbulensi (Endhiah, 2011). Model K-Epsilon menambahkan dua buah persamaan transport yaitu berdasarkan variabel K dan ϵ . Berikut persamaan dengan variabel K

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \partial/\partial x_i(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_i}{\partial \varepsilon} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + P_k + P_b - \rho_c - \gamma_m + S_k \quad (2.1)$$

Berikut dengan persamaan dengan variabel ε

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_i}{\partial \varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] + C_1 \frac{\varepsilon}{k} (P_k + C_\mu P_b) - C_2 \rho \frac{k^2}{k} + S_i \quad (2.2)$$

Hubungan-hubungan tersebut berlaku dengan nilai:

a. Viskositas Turbulensi

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (2.3)$$

b. Nilai Produksi K

$$P_k = \rho u_i u_j \frac{\partial \mu_i}{\partial x_i} \quad (2.4)$$

$$P_k = u_t S^2 \quad (2.5)$$

Dimana S adalah modulus nilai rata-rata dari strain sensor,
 $S = \sqrt{2} S_{ij} S_{ij}$ (2.6)

c. Efek dari *Bouyancy*

$$P_b = \beta g_i \frac{\mu_t}{P_{rt}} \frac{\partial T}{\partial x_i} \quad (2.7)$$

$$\beta = -\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right) \quad (2.8)$$

Dimana :

Prt adalah bilangan Prandtl dengan nilai standar 0,85

gi adalah nilai gravitasi pada arah i.

Koefisien ekspansi termal (β)

Koefisien-koefisien lainnya

$$C_1 = 1,44 \quad C_2 = 1,92 \quad C_\mu = 0,09 \quad \sigma_k = 1 \quad \sigma_\varepsilon = 1,3$$

2.9 Pemodelan Numerik

Analisa menggunakan CFD memerlukan pemahaman dan pengetahuan dasar bidang mekanika fluida, perpindahan panas dan massa dan sebagainya untuk interpretasi hasil-hasil simulasi. Pemodelan numerik digunakan untuk menyelesaikan sebuah kasus dengan pendekatan dari iterasi terhadap persamaan-persamaan yang berlaku. Pemodelan numerik dalam

kasus studi aliran dan perpindahan panas menggunakan tiga persamaan, diantaranya

a. Persamaan Konversi Massa

Sebuah elemen fluida dalam kasus 3 dimensi dengan dimensi dx , dy dan dz seperti ditunjukkan pada gambar. Konsep dasar dari hukum konservasi massa adalah bahwa jumlah pertambahan massa pada volume control adalah sama dengan jumlah aliran massa yang masuk dan keluar elemen. (Kusuma, 2014)

$$\left[\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} \right] dx dy dz = - \frac{\partial \rho}{\partial t} (dx dy dz) \quad (2.9)$$

Dimana

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \left[\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} \right] = 0$$

Maka

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho V_i}{\partial x_i} = 0$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho V) = 0 \quad (2.10)$$

b. Persamaan Momentum Fluida

Persamaan momentum pada pemodelan numerik menentukan besar kecepatan dan percepatan tiap partikel dari fluida. Persamaan konservasi momentum adalah persamaan yang mendefinisikan gerakan fluida ketika terjadi gaya-gaya pada partikel-partikelnya pada setiap elemen fluida yang didefinisikan di dalam model CFD. Persamaan ini diantaranya :

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} + \rho u \frac{\partial u}{\partial x} + \rho v \frac{\partial u}{\partial y} + \rho w \frac{\partial u}{\partial z} = \rho g_x - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (2.11)$$

$$\rho \frac{\partial v}{\partial t} + \rho u \frac{\partial v}{\partial x} + \rho v \frac{\partial v}{\partial y} + \rho w \frac{\partial v}{\partial z} = \rho g_y - \frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \quad (2.12)$$

$$\rho \frac{\partial w}{\partial t} + \rho u \frac{\partial w}{\partial x} + \rho v \frac{\partial w}{\partial y} + \rho w \frac{\partial w}{\partial z} = \rho g_z - \frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \quad (2.13)$$

c. Persamaan Bernoulli

Hukum Bernoulli menyatakan bahwa tekanan dari fluida yang bergerak seperti udara berkurang ketika fluida tersebut bergerak lebih cepat. Hukum Bernoulli ditemukan oleh Daniel Bernoulli, seorang matematikawan Swiss yang menemukannya pada 1700-an. Hukum Bernoulli untuk fluida yang mengalir pada suatu tempat maka jumlah usaha, energi kinetik, energi potensial fluida persatuan volume fluida tersebut mempunyai nilai yang tetap pada setiap titik. Terdapat beberapa asumsi hukum bernoulli diantaranya:

- a. Fluida tidak dapat dimampatkan (incompressible) dan nonviscous
- b. Tidak ada kehilangan energi akibat gesekan antara fluida dan dinding pipa
- c. Aliran fluida laminar (bersifat tetap)

$$P + \rho gh + \frac{1}{2} \rho v^2 = \text{Konstan} \quad (2.14)$$

$$P_1 + \rho gh_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 = P_2 + \rho gh_2 + \frac{1}{2} \rho v_2^2 \quad (2.15)$$

Dimana :

- | | |
|-----------------------------|----------------------|
| P : Tekanan | (Pascal) |
| v : Kecepatan | (m/s) |
| ρ : Massa jenis fluida | (kg/m ³) |
| h : ketinggian | (m) |
| g : percepatan gravitasi | (m/s) |

d. Persamaan Kontinuitas

Persamaan kontinuitas adalah persamaan yang menghubungkan kecepatan fluida dari satu tempat ke tempat lain. Persamaan kontinuitas menunjukkan bahwa kecepatan fluida berkurang ketika melalui pipa lebar dan

bertambah ketika melewati pipa sempit. Dalam aliran tabung, fluida masuk dan keluar melalui mulut tabung.

$$\Delta m_1 = \Delta m_2 \quad (2.16)$$

$$\rho_1 A_1 v_1 = \rho_2 A_2 v_2 \quad (2.17)$$

Persamaan diatas adalah persamaan kontinuitas. Karena sifat fluida yang inkompresibel atau massa jenisnya tetap. Maka persamaan menjadi :

$$A_1 v_1 = A_2 v_2 \quad (2.18)$$

Dimana :

A : Luas penampang (m^2)

v : Kecepatan aliran (m/s)

2.10 Computational Fluid Dynamics

Computational Fluid Dynamics (CFD) merupakan metode penghitungan dengan sebuah kontrol dimensi, luas dan volume dengan memanfaatkan bantuan komputasi komputer untuk melakukan perhitungan pada tiap-tiap elemen pembagiannya. Pada Geometri yang disimulasikan akan dibagi menjadi bagian – bagian kecil yang disebut dengan kontrol volume. Di setiap kontrol volume ini akan dilakukan perhitungan matematis. Semakin banyak kontrol volume yang dibuat maka akan semakin banyak juga perhitungan yang dilakukan dan menyebabkan kerja komputer yang semakin berat. Dalam melakukan simulasi menggunakan CFD, terdapat tiga tahapan yang harus dilaksanakan yaitu:

a. Pre-Processing

Pada tahap ini dilakukan pembentukan geometri yang akan di simulasikan dan pendefinisian *boundary condition*. Proses setelah geometri yaitu *meshing*, *meshing* adalah proses pembagian geometri menjadi kontrol volume kecil yang menjadi tempat perhitungan matematis. Semakin banyak kontrol volume yang dibuat maka akan semakin halus pula hasil yang didapatkan.

b. *Processing*

Pada tahap ini akan dihitung data – data yang sudah di masukan sebelumnya secara iterasi. Iterasi dilakukan hingga perhitungan konvergen dan memiliki *error* yang kecil.

c. *Post-Processing*

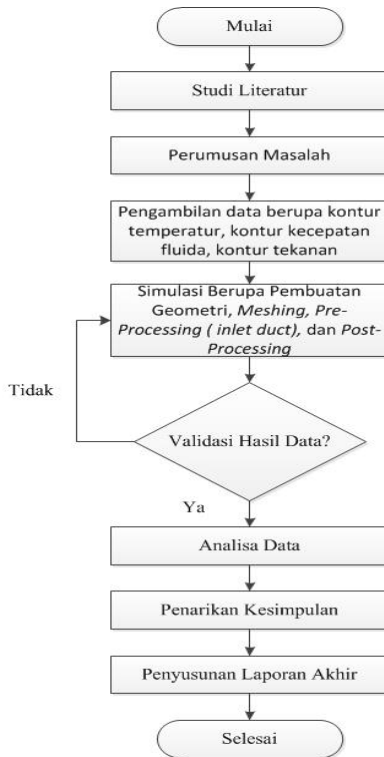
Tahap terakhir ini adalah tahap dimana data hasilperhitungan dapat dilihat dalam beberapa bentuk seperti grafik, gambar, dan animasi dengan pola warna tertentu (Wardhana, 2014)

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Tahap-Tahap Penelitian

Secara umum tahapan penelitian pada tugas akhir ini dapat digambarkan dalam diagram alir seperti gambar 3.1. di bawah ini.



Gambar 3.1 Skema diagram alir penelitian Tugas Akhir

Metodologi untuk melakukan tugas akhir simulasi HRSG secara numerik dari PT. PJB UP Gresik dengan menggunakan *Software* CFD FLUENT adalah sebagai berikut :

A. Studi Literatur

Pada tahap awal pengerjaan tugas akhir ini yaitu studi literatur, dimana penulis mengumpulkan informasi dan mempelajari teori-teori yang berhubungan dengan tugas akhir melewati jurnal, buku, internet atau referensi lainnya. Materi yang dipelajari diantaranya bentuk umum dari HRSG, karakteristik fluida dalam HRSG, siklus PLTGU. Prinsip perpindahan panas pada HRSG, metode *computational fluid dynamics* (CFD) yang digunakan untuk menganalisa hasil simulasi

B. Perumusan Masalah

Pada tahap ini rumusan masalah akan menjadi penentu apa bahasan yang akan dilakukan dalam penelitian tersebut. Pertanyaan-pertanyaan yang diajukan dalam perumusan masalah, kemudian akan dijawab dalam proses penelitian dan tertuang secara sistematis dalam laporan penelitian. Perumusan masalah pada tugas akhir ini yaitu bagaimana pengaruh variasi *inlet duct* terhadap karakteristik aliran dan pengaruhnya terhadap performansi perpindahan panas pada HRSG

C. Pengumpulan Data

Langkah ini yaitu mengumpulkan data baik berupa data primer maupun sekunder. Data-data ini berupa data hasil *performance* test dan juga data desain dari HRSG tipe vertikal pada PT.PJB UP Gresik. Data-data yang dibutuhkan antara lain adalah sebagai berikut :

1. Desain HRSG dari PLTGU PT PJB UP gresik
2. Temperatur di tiap *heat exchanger*
3. Temperatur dan tekanan pada *exhaust turbin gas*
4. Material *flue gas*

D. Melakukan Pemodelan

Pada tahap ini dibagi menjadi tiga proses yaitu *preprocessing*, *processing*, dan *post-processing*

E. Simulasi

Langkah awal dalam tahap simulasi yaitu menentukan jenis *heat recovery steam generator* (HRSG) yang akan

dianalisa yaitu HRSG tipe Vertikal. Pada tugas akhir ini memvariasikan sudut pada *inlet duct* yaitu dengan sudut 105° , 110° , 115° , 117° , 120° dan 125° . *Preprocessing* dilakukan sebagai metode awal dalam penelitian untuk membangun dan menganalisa sebuah model komputasi (CFD). Tahapan *Preprocessing* terdiri dari beberapa sub-tahapan antara lain: pembuatan geometri, penentuan domain, pembuatan *meshing* dan penentuan parameter-parameter yang digunakan. Geometri yang dibentuk dalam penelitian ini adalah geometri *Heat Recovery Steam Generator* jenis vertikal. Pemodelan geometri dilakukan dengan menggunakan *software* Gambit dan CFD FLUENT

F. Pengambilan data hasil simulasi

Pada tahap ini dilakukan pengambilan data hasil simulasi, data yang didapatkan meliputi distribusi kecepatan, distribusi temperatur dan distribusi tekanan. Data hasil simulasi harus divalidasi terlebih dahulu dengan data yang terdapat di PT PJB UP Gresik. Jika hasil simulasi tidak sesuai dengan teori penunjang maka akan dilakukan simulasi ulang. Data yang sesuai dengan verifikasi akan dilakukan analisis lebih lanjut.

G. Analisa Data

Analisa data dilakukan setelah semua data dari hasil simulasi telah didapatkan. Proses ini dilaksanakan berdasarkan pada teori-teori yang telah dipelajari pada tahap studi literatur.

H. Kesimpulan

Dilakukan penarikan kesimpulan sesuai dengan hasil analisa data yang telah didapatkan.

I. Penyusunan Laporan Akhir

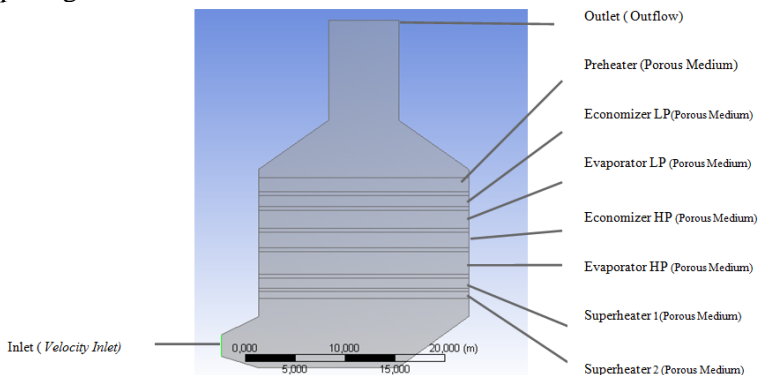
Hasil dari tahap ini adalah laporan tugas akhir yang berisi pendahuluan, tinjauan pustaka, metoda penelitian, analisis dan pembahasan serta kesimpulan dan saran dalam pelaksanaan simulasi yang telah dilakukan

3.2 Tahap *Pre-Processing*

Pada tahap *pre-processing* yaitu terdiri dari pembuatan geometri, *meshing*, dan penentuan domain. Pada tahap ini merupakan tahap awal untuk menganalisa pemodelan *computational fluid dynamics*. Untuk mendapatkan data spesifikasi dan gambar teknik HRSG yang akan digunakan pada proses perhitungan diperoleh dari PT. PJB UP Gresik. Data tersebut akan dijadikan validasi untuk hasil pemodelan numerik yang telah disimulasikan. Perhitungan *porosity* dilakukan untuk memperoleh ratio perpindahan panas pada *heat exchanger*. Perhitungan T_{average} dilakukan untuk mengetahui temperatur *tube* pada *heat exchanger*. Sedangkan perhitungan *inertial resistance* digunakan untuk mengetahui konstanta *minor losses* pada susunan tube pada *heat exchanger* yang nantinya digunakan untuk *set up* pada *porous media*.

3.2.1 Geometri dan pemodelan *Heat Recovery Steam Generator*

Pada proses pembuatan geometri *heat recovery steam generator* (HRSG) tipe vertikal ini dengan menggunakan software GAMBIT 2.2.30. Adapun geometri disesuaikan berdasarkan gambar teknik yang telah didapatkan di PLTGU PT. PJB UP Gresik. Berikut gambar geometri HRSG dapat dilihat pada gambar dibawah ini



Gambar 3.2 Geometri HRSG tipe *vertical*

Pada penelitian tugas akhir ini akan dilakukan uji secara numerik pada HRSG dengan memvariasikan dimensi sudut dari bagian *inlet duct* yang nantinya dapat diketahui variasi sudut mana yang paling baik dalam menghasilkan aliran yang *uniform*.

Heat Exchanger yang berada didalam HRSG diantaranya superheater 2, superheater 1, evaporator HP, Economizer HP, Evaporator LP, Economizer LP, Preheater. Pada simulasi ini, heat exchanger tersebut dianggap sebagai sebuah volume yang berlubang atau disebut juga *porous media*.

Ada 3 macam dimensi *inlet duct* yang akan diteliti. Inlet duct dengan sudut β 105^0 , 110^0 , 115^0 , 117^0 , 120^0 dan 125^0

Tabel 3.1 Studi kasus Pada HRSG

No	Sudut °	Gambar
1	105	
2	110	
2	115	
4	117	

5	120	
6	125	

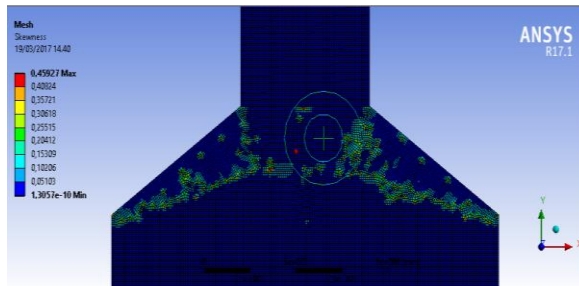
3.2.2 Meshing

Pada tahap selanjutnya yaitu tahap *meshing* dimana pembuatan *mesh* elemen hingga membagi model solid menjadi elemen-elemen kecil sehingga kondisi batas dan beberapa parameter yang dibutuhkan dapat diaplikasikan ke dalam elemen-elemen tersebut. *Meshing* dilakukan dengan menggunakan *mesh* jenis *multizone Quad Tri* dengan hasil *meshing* sebagai berikut :

Tabel 3.2 Mesh Report

Domain	Nodes	Elements
Superheater 2	5352	2442
Superheater 1	4014	1776
Evaporator Hp	11596	5550
Economizer HP	8028	3774
Evaporator LP	9366	4440
Economizer Lp	5798	2664
Preheater	7136	3330
All domains	13150	61851

Dan berikut ini merupakan gambar dari hasil *meshing* menggunakan *display skewness*.



Gambar 3.3 Meshing

Pada hasil *mesh skewness* menunjukkan bahwa error maximum adalah 0,45927. Hal itu menunjukkan bahwa error masih bisa di toleran karena tidak mendekati 1

3.3 Processing

Langkah selanjutnya setelah tahap *meshing* adalah *processing*. dalam proses ini pemodelan dilakukan dengan menggunakan *software* Ansys FLUENT. Beberapa tahap pada proses *processing* yaitu *setting energy equation*, *viscous model*, *operating conditon*, *boundary condition*, *solution*, *initialize*, dan *run calculation*.

3.3.1 Energy Equation

Pada penelitian ini terdapat proses perpindahan panas dengan menggunakan persamaan energi. Oleh karena itu persamaan energi Penelitian yang dilakukan menggunakan persamaan energi karena adanya proses perpindahan panas, maka persamaan energi yang ada pada FLUENT diaktifkan.

3.3.2 Pemilihan *Turbulence Modelling*

Pemilihan *turbulence modeling* yaitu menggunakan model K- ϵ dengan standard k-epsilon model

3.3.3 Material

Menentukan jenis material yang digunakan beserta dengan sifat dan propertiesnya. Dalam penelitian ini dipilih

material jenis *mixture* untuk *flue gas*. Material untuk konstruksi *porous zone* digunakan material baja (*steel*). Untuk material flue gas yaitu dipilih *mixture* dengan fluid diantaranya

Tabel 3.3 Material *flue gas*

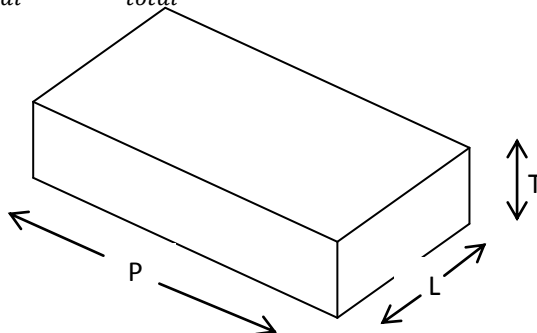
Material	Rumus Kimia	Konsentrasi mol
Carbondioxide	Co2	0,49
n-hexane vapor	C6h14	3,06
n-butane	C4h10	95,35
Methane	Ch4	0,12
propane	C3h8	0,81
ethane	C2h6	0,02
nitrogen	N2	0,15

3.3.4 Cell Zone Condition

Pada simulasi ini, heat exchanger yang berupa kumpulan tube dianggap sebagai sebuah volume yang berlubang atau disebut juga porous medium.. Untuk jajaran *heat exchanger* seperti *superheater*, *evaporator*, *economizer*, dan *preheater* digunakan *Cell zone Condition fluid* berupa pengaturan *porous zone*, *inertial resistance* dan *Source terms*.

Untuk mendapatkan nilai porosity :

$$\varepsilon = \frac{V_{void}}{V_{total}} = \frac{V_{total} - V_{tube}}{V_{total}} = \frac{(PxLxT) - (nx\pi xdxl)}{PxLxT}$$



Gambar 3.4 ilustrasi perhitungan volume total

a. Perhitungan Pada Superheater 2

- *Porosity*

$$porosity = \frac{V_{void}}{V_{total}}$$

$$\begin{aligned}
 porosity &= \frac{V_{void}}{V_{total}} \\
 &= \left(\frac{(16.386 \times 7.254 \times 1,11) - (\pi \times 160 \times (0,016^2) / 16,3)}{(16.386 \times 7.254 \times 1,11)} \right) \\
 &= 0.984
 \end{aligned}$$

Tabel 3.4 Perhitungan porosity pada setiap *heat exchanger*

Komponen	Porosity
Superheater 2	0,984
Superheater 1	0,983
Evaporator Hp	0,96
Economizer HP	0,942
Evaporator LP	0,947
Economizer Lp	0,992
Preheater	0,946

- Konstanta *inertial resistance* :

Data awal	ΔP	: 149
	V_x	: 2,1
	L	: 1,427
	ρ	: 0,99

Perhitungan :

$$\begin{aligned}
 \Delta P &= C_2 \frac{1}{2} \rho V^2 L \\
 C_2 &= \frac{2 \Delta P}{\rho V^2 L}
 \end{aligned}$$

$$C_2 = \frac{2 \times 149}{0.99(2,1^2) \times 1,427}$$

$$c_2 = 47,832$$

Dimana

ΔP : *pressure drop*
 V_x : kecepatan arah x
 L : Tebal Porous Media
 C_2 : *Inertial Resistance*
 ρ : Massa Jenis

Tabel 3.5 Hasil Perhitungan *inertial Resistance* pada setiap *Heat exchanger*

Komponen	C_2
Superheater 2	0.4113
Superheater 1	0,3946
Evaporator Hp	17,547
Economizer HP	40,612
Evaporator LP	37,037
Economizer Lp	65,824
<i>Preheater</i>	47,832

- *Heat Transfer*

$$q_{flue\ gas} = \dot{m}_{flue\ gas} \times C_{p_{flue\ gas}} \times T_{in} - T_{out}$$

$$\begin{aligned}
 q_{flue\ gas} &= 440,745 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \times 10599,87 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \times (64) \text{K} \times \frac{\text{W}}{\text{J/s}} \times \frac{1 \text{ MW}}{10^6 \text{ W}} \\
 q_{flue\ gas} &= 142898 \text{ W}
 \end{aligned}$$

Dimana :

\dot{m} : Laju aliran massa

C_p : Spesifik Heat

ΔT : Perbedaan Temperatur

Tabel 3.6 Hasil perhitungan heat transfer

Komponen	Q
Superheater 2	164572
Superheater 1	217141
Evaporator Hp	275201
Economizer HP	164572
Evaporator Hp	139410
Economizer Lp	55062,6
<i>Preheater</i>	142898

3.3.5 Boundary Condition

Pada tahap ini paramater dan kondisi yang didapat dari data *actual* yang didapat dari PT PJB UP Gresik dimasukkan pada tahap *Boundary Condition*. Ada dua tahap yaitu *inlet* dan *outlet* Parameter yang dimasukkan diantaranya kecepatan, temperatur

dan material. Pada outlet didefinisikan sebagai kondisi dimana fluida tersebut keluar dari domain atau dalam suatu aplikasi CFD

a. **Inlet**

Pada *inlet disetting* dengan kondisi velocity inlet yaitu berupa kecepatan, temperatur, dan material dari flue gas. Kondisi *inlet* merupakan kondisi awal mula *flue gas* saat memasuki HRSG. Kecepatan Aliran *flue gas* yaitu 15 m/s dan memiliki temperatur awal 796°K. Memiliki material solid berupa *steel*. Nilai material dari *flue gas* diantaranya

Tabel 3.7 Material pada inlet

Material	Nilai mol
Carbondioxide	0,49
n-hexane vapor	3,06
n-butane	95,35
Methane	0,12
propane	0,81
ethane	0,02
nitrogen	0,15

b. **Outlet**

Pada *outlet* di *setting* dengan kondisi *pressure outlet* dengan thermal 378K, gauge pressure 0, dan kolom spesies di isi sesuai material pada tabel 3.6

3.3.7 Monitor Residual

Monitor Residual adalah tahap penyelesaian masalah, berupa proses iterasi hingga mencapai harga konvergensi yang diinginkan. Harga yang ditetapkan adalah 10^{-4} sehingga proses iterasi dinyatakan telah konvergen dengan residual mencapai harga 10^{-4}

3.3.8 Initialize

Kemudian sebelum dilakukan kalkulasi dengan data masukan sebagaimana di acuan fluent yaitu initialize diaktifkan dengan di input dari *inlet*

3.4 Post-Processing

Setelah kalkulasi dilakukan hingga mencapai nilai yang konvergen, tahap berikutnya yaitu memvisualisasikan dan menganalisa hasil dari solusi numerik tersebut. Didapatkan informasi mengenai *flow field* pada saat kondisi operasi HRSG diantaranya distribusi temperatur dan kecepatan aliran. Informasi yang didapat digunakan untuk mengetahui fenomena aliran yang terjadi pada HRSG. Kemudian akan divisualisasikan dalam bentuk kontur *velocity*, kontur temperatur, *velocity vector* dan dibuat grafik untuk memperjelas analisa

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB IV

ANALISA DATA

4.1 Analisa hasil simulasi

Analisa hasil simulasi dilakukan setelah melakukan tahap *processing*. Data yang diambil dari hasil simulasi berupa data kualitatif visualisasi aliran dan distribusi temperatur sedangkan data kuantitatif berupa kecepatan aliran dan distribusi temperatur. Tapi sebelum dilakukan analisa terlebih dahulu dilakukan validasi data berupa temperatur yaitu perbandingan temperatur aktual pada HRSG di PT PJB Up Gresik dan temperatur pada simulasi yang telah dilakukan

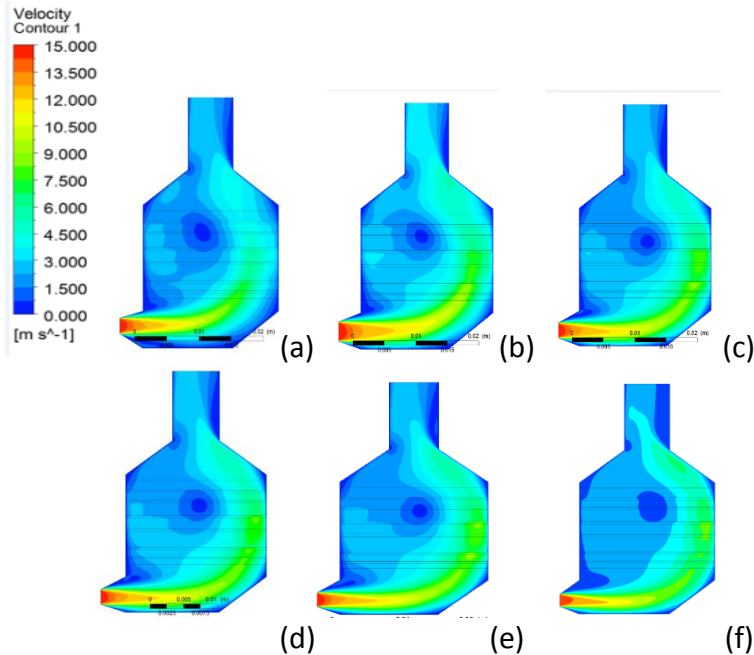
Tabel 4.1 Validasi temperatur aktual dan temperatur simulasi

Komponen	Temperatur aktual (K)	Temperatur Simulasi (K)	Error (%)
Superheater 2	742	735	6,8
Superheater 1	700	695,2	4,8
Evaporator Hp	568	570,3	2,34
Economizer HP	536	540	4
Evaporator LP	432	438	7
Economizer Lp	412.4	417	4,9
Preheater	358	360,5	2,5

Dari tabel validasi diatas dapat diketahui error yang dihasilkan tidak mencapai 10% sehingga simulasi HRSG dapat dikatakan mendekati HRSG aktual

4.2 Analisa kontur *velocity* dengan variasi sudut

Profil aliran *flue gas* saat memasuki HRSG memiliki profil seperti pada gambar dibawah



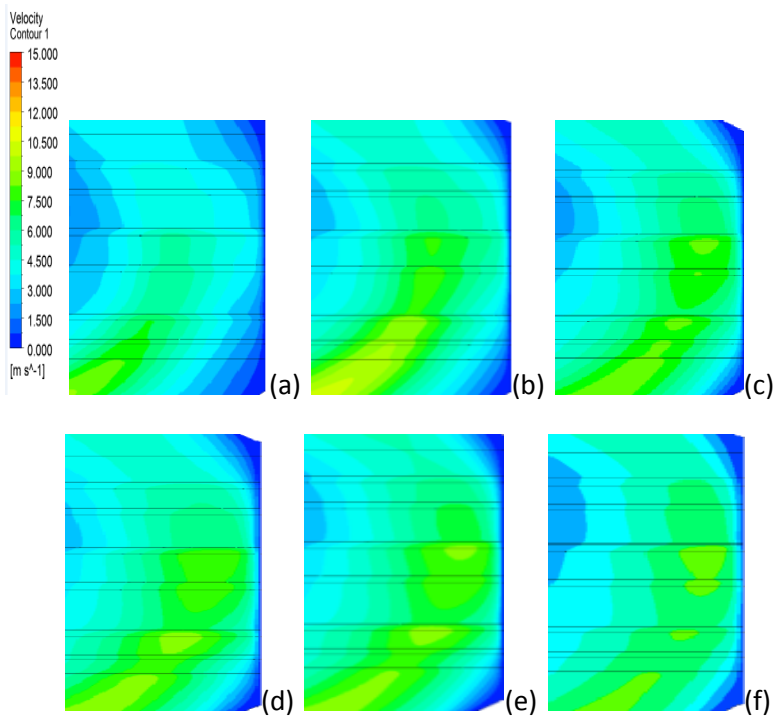
Gambar 4.1 Kontur *velocity* pada HRSG variasi sudut *inlet duct* (a)105°, (b)110°, (c) 115°, (d) 117° (e) 120° (f) 125°.

Pada gambar 4.1 menunjukkan kontur kecepatan *flue gas* melewati HRSG dengan variasi sudut *inlet duct* dengan sudut 105°, 110°, 115°, 117°, 120° dan sudut 125°. Dari hasil simulasi diketahui bahwa aliran di dalam *inlet duct* terdapat *back flow* pada bagian tengah sehingga menyebabkan aliran *flue gas* terbagi menjadi dua aliran yaitu aliran yang menuju sisi bawah dan sisi atas. Pada keenam HRSG tersebut memiliki penampang *inlet duct* yang kecil sehingga mengakibatkan kecepatan *flue gas* yang

tinggi pada sisi *inlet*. Pada HRSG dengan *inlet duct* variasi sudut 105° dan 110° memiliki kecepatan tinggi yang lebih lebar. Hal itu terlihat dari kontur warna merah yang lebih lebar dibandingkan dengan hrsg variasi sudut lainnya. Pada variasi sudut 117° dan 120° kontur yang dihasilkan hampir mirip, yaitu warna merah yang lebih panjang. Sedangkan pada sudut 125° kontur warna merah lebih kecil.

Namun pada sudut 105° mengalami penurunan kecepatan yang cukup besar jika dibandingkan dengan sudut 110° . Terlihat kontur warna hijau hanya sampai HP Evaporator. Pada sudut 115° , 117° , dan 120° kecepatan aliran bisa mencapai preheater. Sedangkan pada sudut 125° kecepatan aliran masih tinggi hingga menuju *stack*. Hal itu dikarenakan sudut yang besar maka luas penampang dari *inlet* juga akan semakin kecil sehingga aliran *flue gas* akan memiliki kecepatan yang tinggi dan lebih leluasa memasuki *heat exchanger*, sehingga kecepatan *flue gas* pada posisi *heat exchanger* bagian atas masih tinggi. Sedangkan pada HRSG *inlet duct* sudut yang kecil memiliki kecepatan aliran yang tinggi hanya pada sampai Evaporator HP hal itu dikarenakan sudut *inlet duct* yang kecil mengakibatkan luas penampang *inlet* semakin besar sehingga kecepatan aliran *flue gas* lebih cepat mengalami penurunan

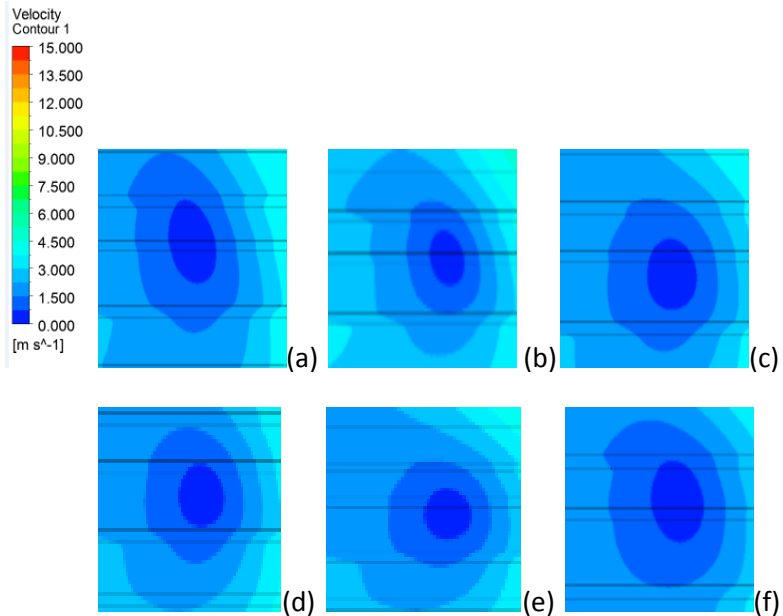
Pola kontur kecepatan *flue gas* yang dihasilkan pada keenam HRSG tersebut bervariasi sehingga dapat mempengaruhi distribusi panas *flue gas* yang kemudian dapat berpengaruh perpindahan panas antara *flue gas* dan *steam*. Jika dilihat aliran yang paling *uniform* adalah hrsg *inlet duct* dengan sudut 125°



Gambar 4.2 Kontur *velocity* potongan vertical pada variasi sudut (a)105°, (b)110°, (c) 115°, (d) 117° (e) 120° (f) 125°.

Pada gambar diatas menunjukkan kontur kecepatan saat melewati *heat exchanger* yaitu pada *inlet duct* dengan sudut 105°, 110°, 115°, 117°, 120°, 125°. Kecepatan yang paling besar terjadi pada sudut 120° dan sudut 120°. Hal itu terlihat kontur warna hijau yang lebih lebar dan tinggi dibandingkan dengan kontur warna biru. Sedangkan pada sudut 105° memiliki kecepatan yang lebih kecil. Dapat dilihat pada kontur warna hijau yang dihasilkan lebih kecil dan sedikit dibandingkan dengan kontur warna biru. Hal itu sesuai dengan hukum kontinuitas bahwa luas penampang berbanding terbalik dengan kecepatan.

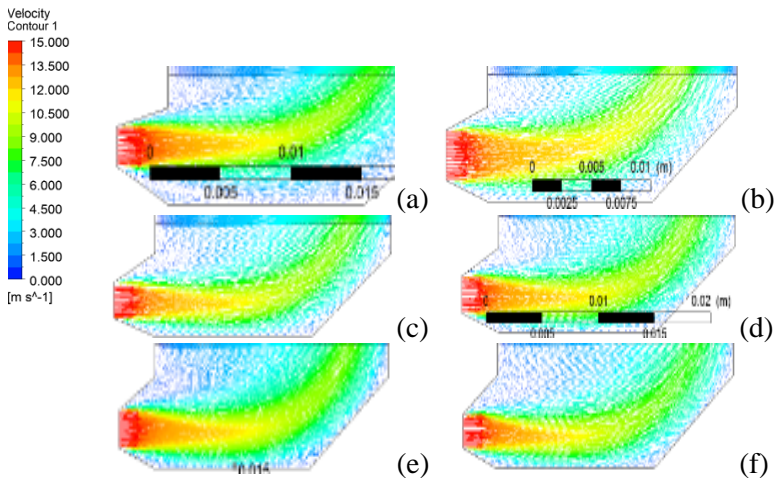
Pada sudut 105° memiliki luas penampang yang besar sehingga kecepatan aliran akan lebih cepat menurun



Gambar 4.3 *Vortex pada heat exchanger variasi sudut inlet duct* (a) 105° , (b) 110° , (c) 115° , (d) 117° (e) 120° (f) 125° .

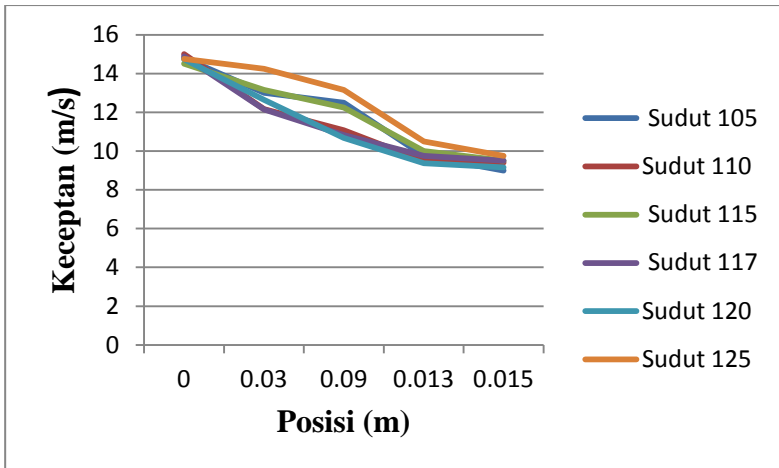
Dari keenam HRSG diatas dapat temukan fenomena *vortex* pada sisi tengah jajaran *heat exchanger*. Pada keenam HRSG tersebut dapat dilihat *vortex* yang lebih lebar yaitu pada HRSG *inlet duct* sudut 125° dan yang paling kecil yaitu pada HRSG *inlet duct* sudut 105° . Pada sudut 110° memiliki kontur warna biru muda yang lebih besar dibandingkan dengan sudut lainnya. Namun semakin bertambahnya sudut warna biru muda semakin mengecil dan warna biru tua semakin besar. *Vortex* diakibatkan aliran pada posisi tersebut mengalami turbulensi dikarenakan adanya perbedaan tekanan pada sisi kanan dan sisi

kiri. Sehingga aliran akan bergerak disisi tengah *heat exchanger* sebelum akhirnya keluar menuju *stack*. Pada HRSG *inlet duct* sudut 105° memiliki *vortex* yang lebih kecil diakibatkan luas penampang dari *inlet* yang lebih besar dibandingkan kedua hrsg lainnya. Sehingga aliran *flue gas* tidak terhambat dan akan lebih leluasa memasuki *heat exchanger*. Begitu pula sebaliknya sudut yang besar mengakibatkan luas penampang dari *inlet duct* akan semakin kecil sehingga aliran *flue gas* akan terhambat dan tidak leluasa memasuki *heat exchanger* sehingga memungkinkan aliran mengalami turbulensi yang lebih besar.



Gambar 4.4 Vektor kecepatan HRSG variasi sudut *inlet duct*
(a) 105° , (b) 110° , (c) 115° , (d) 117° (e) 120° (f) 125°

Gambar diatas menunjukkan vektor kecepatan *flue gas* pada setiap HRSG. Berikut ini merupakan grafik untuk memperjelas kontur aliran *flue gas*, diambil beberapa sampel pada beberapa titik koordinat sebelum memasuki superheater, ditunjukkan pada gambar berikut



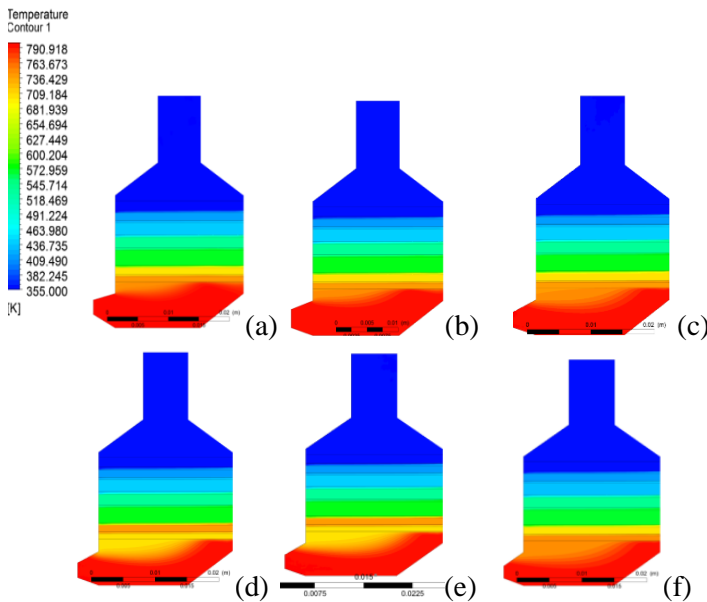
Gambar 4.5 Grafik perbandingan kontur kecepatan *flue gas* sebelum masuk ke *superheater*

Gambar tersebut menunjukkan grafik perbandingan kontur kecepatan *flue gas* sebelum masuk ke *superheater*. Dapat diketahui kecepatan aliran setelah melewati *inlet duct* yang paling tinggi yaitu pada koordinat 0 pada hrsg *inlet duct* sudut 110° yaitu 15 m/s kemudian hrsg *inlet duct* sudut 105° dan sudut 117° dengan 14,8 m/s, hrsg *inlet duct* sudut 120° sebesar 14,73 m/s dan sudut 115° sebesar 14,5 m/s. Namun pada koordinat 0,003 mengalami penurunan kecepatan diantaranya penurunan kecepatan yang paling besar dialami oleh hrsg sudut 105° pada koordinat 0,003 sebesar 2 m/s dan sudut 110° sebesar 2,84 m/s. Sedangkan pada hrsg *inlet duct* sudut 125° mengalami penurunan kecepatan yang paling sedikit yaitu sebesar 0,5 m/s. Dan pada hrsg *inlet duct* sudut 115° mengalami penurunan kecepatan sebesar 1,35 m/s.

Grafik kecepatan terus mengalami penurunan seiring bertambahnya Y. Namun penurunan kecepatan yang paling banyak terjadi pada hrsg *inlet duct* sudut 105° dan sudut 110° dengan rata-rata penurunan sebesar 1,45 m/s. Dan penurunan yang paling sedikit yaitu pada hrsg *inlet duct* sudut aktual dan

sudut 120° dan sudut 125° yaitu 1,3 m/s dan 1,25 m/s. Hal itu disebabkan oleh pengaruh variasi sudut, dimana sudut yang kecil akan memberikan luas penampang yang besar sehingga aliran berkecepatan tinggi akan lebih cepat mengalami penurunan. Sedangkan sudut yang besar akan memberi luasan yang lebih sempit pada penampang *inlet duct* sehingga kecepatan juga akan semakin tinggi dan leluasa memasuki *heat exchanger*

4.3 Analisa kontur temperatur dengan variasi sudut

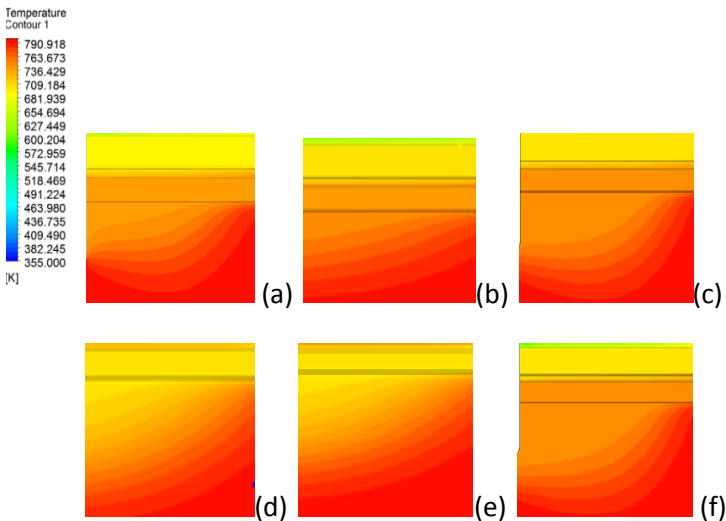


Gambar 4.6 Kontur Temperatur pada HRSG variasi sudut *inlet duct* (a) 105° , (b) 110° , (c) 115° , (d) 117° (e) 120° (f) 125° .

Gambar diatas merupakan kontur distribusi temperatur *flue gas* saat melewati jajaran *heat exchanger* yang dimodelkan sebagai *porous medium* pada HRSG yang telah divariasikan sudutnya maupun sudut aktual. Sudut *inlet duct* yang divariasikan yaitu sudut 105° , 110° , 115° , 117° , 120° , 125° . Pada keenam

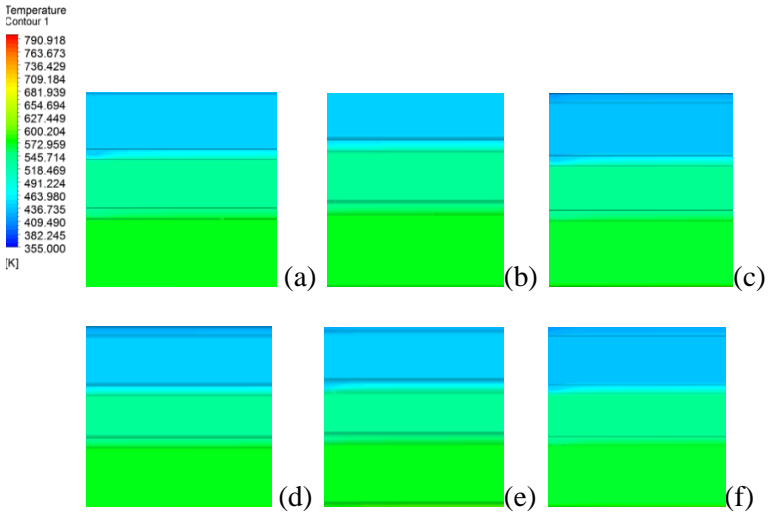
gambar tersebut memiliki pola temperatur yang mirip. Terjadi perpindahan panas dari *flue gas* ke *heat exchanger*. Sesuai dengan fungsi dari masing-masing *heat exchanger* tersebut maka semakin ke atas menuju *preheater*, temperatur *flue gas* semakin turun. Dan suhu yang paling tinggi terletak pada *superheater*.

Pada keenam HRSG tersebut terdapat perbedaan kontur temperatur pada saat melewati *inlet duct* karena pada posisi tersebut merupakan posisi dimana aliran mengalami *backflow* sehingga temperatur dibagian atas lebih rendah dari pada temperatur bagian bawah. Setelah melewati *superheater* tidak ada perbedaan kontur temperatur yang terjadi dan lebih *uniform*. Pada hrsg *inlet duct* sudut 125° memiliki kontur temperatur yang lebih tinggi setelah melewati *superheater* namun temperatur pada saat melewati *inlet duct* yang lebih tinggi yaitu pada hrsg *inlet duct* sudut 105° dan sudut 110°



Gambar 4.7 Kontur temperatur sebelum masuk superheater variasi sudut *inlet duct* (a) 105° , (b) 110° , (c) 115° , (d) 117° (e) 120° (f) 125°

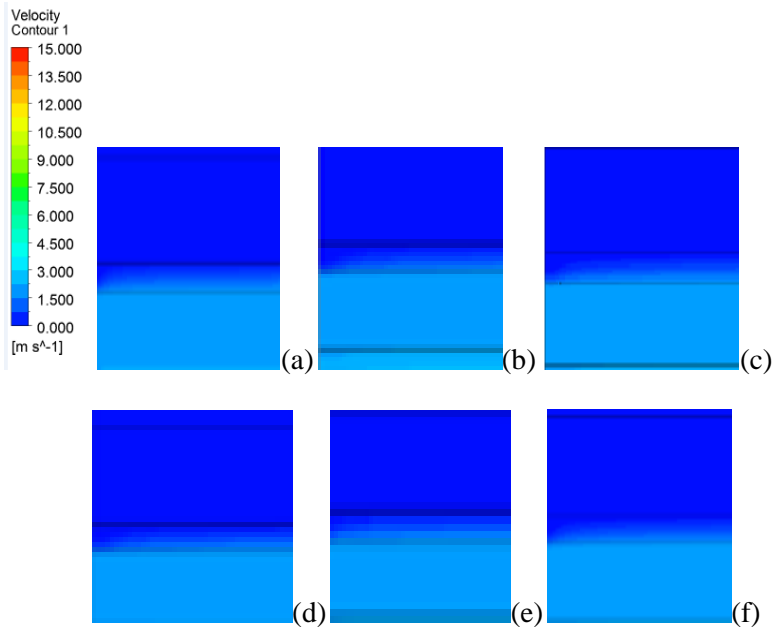
Gambar 4.6 menunjukkan penyebaran temperatur *flue gas* pada penampang Y sesaat setelah melewati *inlet duct* dan sebelum melewati *superheater*. pada keenam hrsg tersebut memiliki temperatur yang tinggi yang terletak pada bagian tepi bawah penampang. Dan semakin keatas memiliki temperatur yang lebih rendah. Pada HRSG *inlet duct* variasi sudut 105° dan sudut 110° memiliki temperatur aliran *flue gas* yang lebih tinggi hingga hampir mencapai *superheater*, terlihat dari pola warna merah yang lebih luas. Pada sudut 117° dan 120° kontur warna merah yang dihasilkan tidak merata hingga *superheater*. Sedangkan pada hrsg *inlet duct* sudut 125° memiliki pola yang hampir mirip dengan hrsg *inlet duct* sudut aktual (115°). Namun pada *inlet duct* sudut 105° dan sudut 110° setelah melewati *superheater* mengalami penurunan temperatur yang lebih cepat Hal itu dipengaruhi oleh penurunan kecepatan aliran yang terjadi setelah melewati *inlet duct*. Sedangkan pada sudut 120° dan sudut 125° temperatur yang dihasilkan masih tinggi. Hal ini menunjukkan bahwa penyebaran temperatur lebih bagus. Terkonsentrasinya temperatur yang tinggi pada bagian bawah penampang dari ketiga HRSG diatas disebabkan oleh kecepatan *flue gas* yang lebih cepat sehingga mengakibatkan pertukaran panas kurang optimal, sehingga dibutuhkan kecepatan yang sesuai agar pertukaran panas yang terjadi lebih *uniform*.



Gambar 4.8 Kontur temperatur pada *evaporator hp*, *economizer hp*, *evaporator lp* variasi sudut *inlet duct* (a) 105°, (b) 110°, (c) 115°, (d) 117° (e) 120° (f) 125°

Setelah melewati superheater 1 dan superheater 2 selanjutnya yaitu melewati *Evaporator Hp*, *Economizer Hp*, dan *Evaporator Lp*. Pada keenam hrsg tersebut menunjukkan perbedaan temperatur setelah melewati superheater 1. Pada komponen *evaporator Hp* yang masih memiliki temperatur yang tinggi yaitu pada hrsg *inlet duct* dengan sudut 125° dan sudut 120° dengan temperatur *in* sebesar 575 °K dan temperatur *out* sebesar 565 ° K. Pada hrsg sudut 105 memiliki temperatur *in* sebesar 568 °K dan temperatur *out* sebesar 555 °K dan pada sudut 110° memiliki temperatur *in* sebesar 570 °K dan temperatur *out* sebesar 559 °K. Sedangkan pada hrsg sudut aktual memiliki temperatur *in* 570 °K dan temperatur *out* 560 °K. Pada komponen tersebut terjadi perbedaan temperatur yang cukup besar. Hal itu dikarenakan komponen *evaporator* memiliki penampang yang lebih tinggi dan lebih lebar daripada komponen *heat exchanger* lainnya sehingga pertukaran panas yang terjadi juga semakin tinggi dan menyebabkan penurunan temperatur dari komponen

sebelumnya. Setelah memasuki *evaporator* kemudian masuk ke *economizer* HP dan *evaporator* LP. Semakin ke atas mengalami penurunan temperatur. Kemudian temperatur *Evaporator* LP pada sudut 117° memiliki nilai yang lebih tinggi 431 °K dibandingkan dengan *hrsg* sudut lainnya



Gambar 4.9 Kontur temperatur pada *economizer lp* dan *preheater* variasi sudut *inlet duct* (a) 105° , (b) 110° , (c) 115° , (d) 117° (e) 120° (f) 125°

Pada gambar tersebut menunjukkan kontur temperatur yang akan melewati *economizer lp* dan *preheater*. Pada *heat exchanger* ini tidak membutuhkan panas yang tinggi, dikarenakan fungsi dari *heat exchanger* itu sendiri hanya memanaskan air dengan temperatur *steam* hingga 150°C . Pada temperatur *flue gas* semakin ke atas akan semakin berkurang atau menurun dikarenakan panas dari turbin gas telah terserap pada *heat*

exchanger sebelumnya. Sehingga temperatur gas buang yang keluar dari *stack* akan semakin rendah. Pada hrsg sudut 105° memiliki temperatur *flue gas* pada economizer lp sebesar 396°K dan pada preheater sebesar 350°K . Pada sudut 110° memiliki temperatur *flue gas* pada economizer lp sebesar 399°K dan pada preheater sebesar 361° . Sudut 115° memiliki temperatur *flue gas* pada economizer lp sebesar 405°K dan pada preheater sebesar 360 sudut 117° memiliki temperatur *flue gas* pada economizer lp sebesar 384°K dan pada preheater sebesar 364°K . Sudut 120° memiliki temperatur *flue gas* pada economizer lp sebesar 364°K dan pada preheater sebesar 410 . Sedangkan pada hrsg *inlet duct* dengan sudut 125° memiliki temperatur *flue gas* pada *economizer lp* sebesar 410°K dan *preheater* sebesar 370° .

Berikut merupakan distribusi temperatur pada ketiga HRSG, Tabel 4.2 menunjukkan nilai distribusi temperatur

Tabel 4.2 Nilai Distribusi Temperatur

Heat Exchanger	105	110	115	117	120	125
	($^{\circ}\text{K}$)	($^{\circ}\text{K}$)	($^{\circ}\text{K}$)	($^{\circ}\text{K}$)	($^{\circ}\text{K}$)	($^{\circ}\text{K}$)
Superheater 2	731	736	725	702	704,6	740
Superheater 1	694	652	675	741	737	627
Evaporator HP	558	559	560	566	565	565
Economizer HP	521	526	525	516	506	531
Evaporator LP	426	429	429	431	428	413
Economizer LP	396	399	405	384	364	410
Preheater	350	361	360	365	355	370

Dari tabel 4.2 menunjukkan nilai temperatur hasil simulasi pada masing-masing variasi sudut. Terlihat temperatur yang dihasilkan pada variasi sudut 125° dan sudut 120° lebih tinggi dibandingkan dengan sudut lainnya. Sedangkan pada sudut 105° memiliki suhu yang paling rendah. Hal itu dikarenakan pengaruh

sudut yang diberikan dan pengaruh kecepatan flue gas. Sudut akan mempengaruhi kecepatan dari flue gas. Pada sudut 125° memiliki turbulensi aliran yang lebih besar sehingga penyerapan panas juga lebih optimal. Sedangkan pada sudut 10° dan sudut 110° mengalami penurunan kecepatan flue gas sehingga mempengaruhi perpindahan panas.

4.3 Heat Transfer Pada HRSG

Pada tabel dibawah ini yaitu guna mengetahui nilai perpindahan panas yang terjadi antara fluida *exhaust* gas dan *steam* pada HRSG dengan variasi sudut.

Tabel 4.3 Perbandingan peprindahan pada komponen HRSG pada masing-masing variasi

Komponen	105°	110°	115°	117°	120°	125°
Preheater	13051,1	14330	17148	14290	57159,1	40579,5
LP Economizer	10028,4	30312	34295	80023	160045	47159,1
LP Evaporator	31474,9	21523	35722	40011	14289,8	90034,1
HP Economizer	134324	17176	41869	57159	85738,6	40010,4
HP Evaporator	40149,4	40114	45720	5715,9	8573,86	40011,4
HP Superheater 1	110182	200074	150169	22864	14289,8	118631
HP Superheater 2	30301,1	20778	30580	151472	44012,5	52875

Pada tabel diatas menunjukkan perpindahan panas. Nilai perpindahan panas yang terbesar terjadi pada variasi hrsg *inlet duct* sudut 125° dengan perpindahan panas total sebesar $384108,99 \text{ W/m}^2\text{K}$, kemudian pada sudut 117° dengan perpindahan panas total sebesar $371534 \text{ W/m}^2\text{K}$, sudut 10° dengan perpindahan panas total yaitu $369510,56 \text{ W/m}^2\text{K}$. Dan perpindahan panas yang paling kecil yaitu pada sudut 110 sebesar

344306 W/m²K. Dapat disimpulkan bahwa perpindahan panas terbesar terjadi pada *inlet duct* sudut 12 °. Hal itu sesuai dengan kontur temperatur dan kontur kecepatan yang dihasilkan pada variasi *inlet duct* sudut 125 °. Dapat dikatakan panas yang terserap juga lebih optimal sehingga temperatur *steam* dapat tercapai. Nilai heat transfer terbesar rata-rata pada komponen HP Superheater. Hal itu dikarenakan pada komponen tersebut memiliki luasan yang lebih besar dibandingkan dengan komponen lainnya. Dan pada HP Superheater terjadi proses pembentukan *steam superheated* jadi panas yang diserap juga semakin banyak

4.4 Pembahasan

Telah dilakukan penelitian tugas akhir tentang variasi sudut *inlet duct* hrsg tipe vertikal terhadap karakteristik aliran dan perpindahan panas dengan menggunakan metode komputasi dinamika fluida di PT PJB UP Gresik berdasarkan diagram alir yang telah ditetapkan. Pada tugas akhir ini yaitu untuk mendapatkan karakteristik aliran dan perpindahan panas yang *uniform* dengan melakukan simulasi. Ada 3 proses penting dalam simulasi ini diantaranya *preprocessing*, *processing*, dan *post-processing*. Setelah tahap tersebut dilakukan yaitu pengambilan data simulasi kemudian terlebih dahulu dilakukan validasi. Validasi yang dilakukan yaitu membandingkan temperatur aktual (temperatur desain HRSG PT PJB) dengan temperatur simulasi. Rata-rata error yang dihasilkan yaitu sebesar 7% dimana error tersebut masih bisa ditoleran dan dikatakan mendekati hrsg desain PT.PJB.

Analisa yang pertama yaitu membandingkan kontur *velocity* pada hrsg yang telah divariasikan sudutnya. 105°, 110 °, 115°, 117°, 120° dan sudut 125 °. Pada HRSG dengan *inlet duct* variasi sudut 105 ° dan 110 ° memiliki kecepatan tinggi yang lebih lebar. Hal itu terlihat dari kontur warna merah yang lebih lebar dibandingkan dengan hrsg variasi sudut lainnya. Pada variasi sudut 117 ° dan 120° kontur yang dihasilkan hampir mirip, yaitu warna merah yang lebih panjang. Sedangkan pada sudut 125° kontur warna merah lebih kecil. Namun pada sudut 105°

mengalami penurunan kecepatan yang cukup besar jika dibandingkan dengan sudut 110° . Terlihat kontur warna hijau hanya sampai HP Evaporator. Pada sudut 115° , 117° , dan 120° kecepatan aliran bisa mencapai preheater. Sedangkan pada sudut 125° kecepatan aliran masih tinggi hingga menuju *stack*. Hal itu dikarenakan sudut yang besar maka luas penampang dari *inlet* juga akan semakin kecil sehingga aliran *flue gas* akan memiliki kecepatan yang tinggi dan lebih leluasa memasuki *heat exchanger*, sehingga kecepatan *flue gas* pada posisi *heat exchanger* bagian atas masih tinggi. Sedangkan pada HRSG *inlet duct* sudut yang kecil memiliki kecepatan aliran yang tinggi hanya pada sampai Evaporator HP hal itu dikarenakan sudut *inlet duct* yang kecil mengakibatkan luas penampang *inlet* semakin besar sehingga kecepatan aliran *flue gas* lebih cepat mengalami penurunan. Pada HRSG *inlet duct* sudut 105° memiliki *vortex* yang lebih kecil diakibatkan luas penampang dari *inlet* yang lebih besar dibandingkan kedua hrsg lainnya. Sehingga aliran *flue gas* tidak terhambat dan akan lebih leluasa memasuki *heat exchanger*. Begitu pula sebaliknya sudut yang besar mengakibatkan luas penampang dari *inlet duct* akan semakin kecil sehingga aliran *flue gas* akan terhambat dan tidak leluasa memasuki *heat exchanger* sehingga memungkinkan aliran mengalami turbulensi yang lebih besar.

Pada HRSG *inlet duct* variasi sudut 105° dan sudut 110° memiliki temperatur aliran *flue gas* yang lebih tinggi hingga hampir mencapai *superheater*, terlihat dari pola warna merah yang lebih luas. Pada sudut 117° dan 120° kontur warna merah yang dihasilkan tidak merata hingga superheater. Sedangkan pada hrsg *inlet duct* sudut 125° memiliki pola yang hampir mirip dengan hrsg *inlet duct* sudut aktual (115°). Namun pada *inlet duct* sudut 105° dan sudut 110° setelah melewati superheater mengalami penurunan temperatur yang lebih cepat Hal itu dipengaruhi oleh penurunan kecepatan aliran yang terjadi setelah melewati *inlet duct*. Sedangkan pada sudut 120° dan sudut 125° temperatur yang dihasilkan masih tinggi. Hal ini menunjukkan bahwa penyebaran temperatur lebih bagus. Terkonsentrasinya

temperatur yang tinggi pada bagian bawah penampang dari ketiga HRSG diatas disebabkan oleh kecepatan *flue gas* yang lebih cepat sehingga mengakibatkan pertukaran panas kurang optimal, sehingga dibutuhkan kecepatan yang sesuai agar pertukaran panas yang terjadi lebih *uniform*. Pada tabel diatas menunjukkan perpindahan panas. Nilai perpindahan panas yang terbesar terjadi pada variasi *inlet duct* sudut 125° dengan perpindahan panas total sebesar $384108,99 \text{ W/m}^2\text{K}$, kemudian pada sudut 117° dengan perpindahan panas total sebesar $371534 \text{ W/m}^2\text{K}$, sudut 105 dengan perpindahan panas total yaitu $369510,56 \text{ W/m}^2\text{K}$. Dan perpindahan panas yang paling kecil yaitu pada sudut 110° sebesar $344306 \text{ W/m}^2\text{K}$. Dapat disimpulkan bahwa perpindahan panas terbesar terjadi pada *inlet duct* sudut 125° . Hal itu sesuai dengan kontur temperatur dan kontur kecepatan yang dihasilkan pada variasi *inlet duct* sudut 125° . Dapat dikatakan panas yang terserap juga lebih optimal sehingga temperatur *steam* dapat tercapai.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB V PENUTUP

5.1. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian variasi sudut inlet duct pada hrsg tipe vertikal menggunakan metode komputasi dinamika fluida di dapatkan kesimpulan yaitu :

- a. Terdapat perbedaan nilai temperatur hasil simulasi numerik dan desain awal HRSG. Error yang terjadi pada komponen *superheater* 2 sebesar 6,8%, *superheater* 1 4,8%, *Evaporator* Hp 2,34%, *Economizer* Hp 4%, *Evaporator* Lp 7%, *Economizer* LP 4,9%, *preheater* 2,5%. Error disebabkan kurang akuratnya simulasi yang dilakukan
- b. HRSG dengan sudut 105° dan sudut 110° lebih cepat mengalami penurunan sebelum memasuki *evaporator* HP. Sedangkan pada hrsg sudut 125° dan sudut 120° memiliki kecepatan aliran yang lebih tinggi hingga melewati *heat exchanger*. Hal itu dikarenakan pengaruh sudut yang diberikan. Semakin besar sudut pada *inlet duct* maka luas penampang dari *inlet duct* juga semakin kecil sehingga kecepatan aliran juga akan tinggi
- c. Pada hrsg sudut 125° memiliki luasan *vortex* yang lebih besar dibandingkan dengan luasan *vortex* hrsg sudut 105°. Hal itu dikarenakan luas penampang dari *inlet* yang lebih kecil dibandingkan kedua hrsg lainnya. Sehingga aliran *flue gas* memiliki kecepatan yang tinggi dan mengakibatkan adanya turbulensi
- d. Perpindahan panas yang paling besar terjadi pada sudut 125 dengan nilai Q sebesar 384108,99 W/m²K. Hal itu dikarenakan pada sudut 125 memiliki kecepatan yang lebih tinggi sehingga mengakibatkan penyerapan panas yang lebih optimal

5.2 Saran

Saran yang dapat berikan pada tugas akhir ini yaitu :

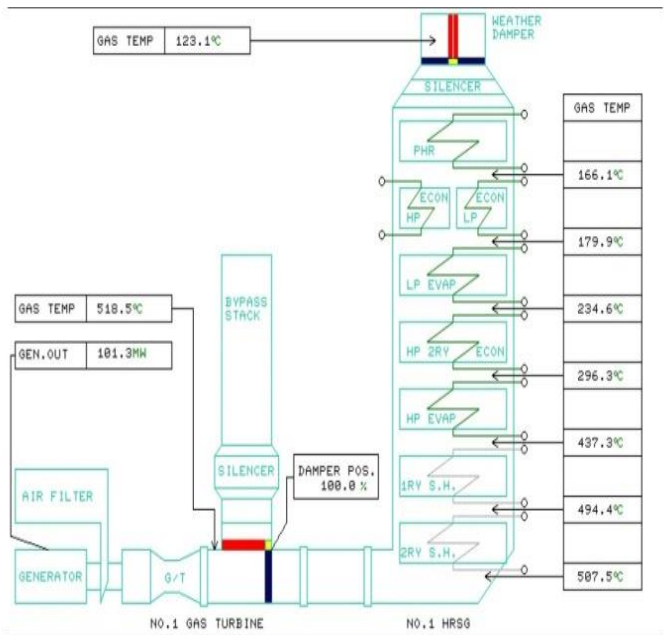
- a. Informasi dan referensi yang lengkap dari *CCR* pada PLTGU akan sangat membantu untuk mendapatkan hasil simulasi yang lebih akurat
- b. Dilakukan variasi sudut α guna mengetahui karakteristik aliran dan perpindahan panas fluida yang paling baik.

DAFTAR PUSTAKA

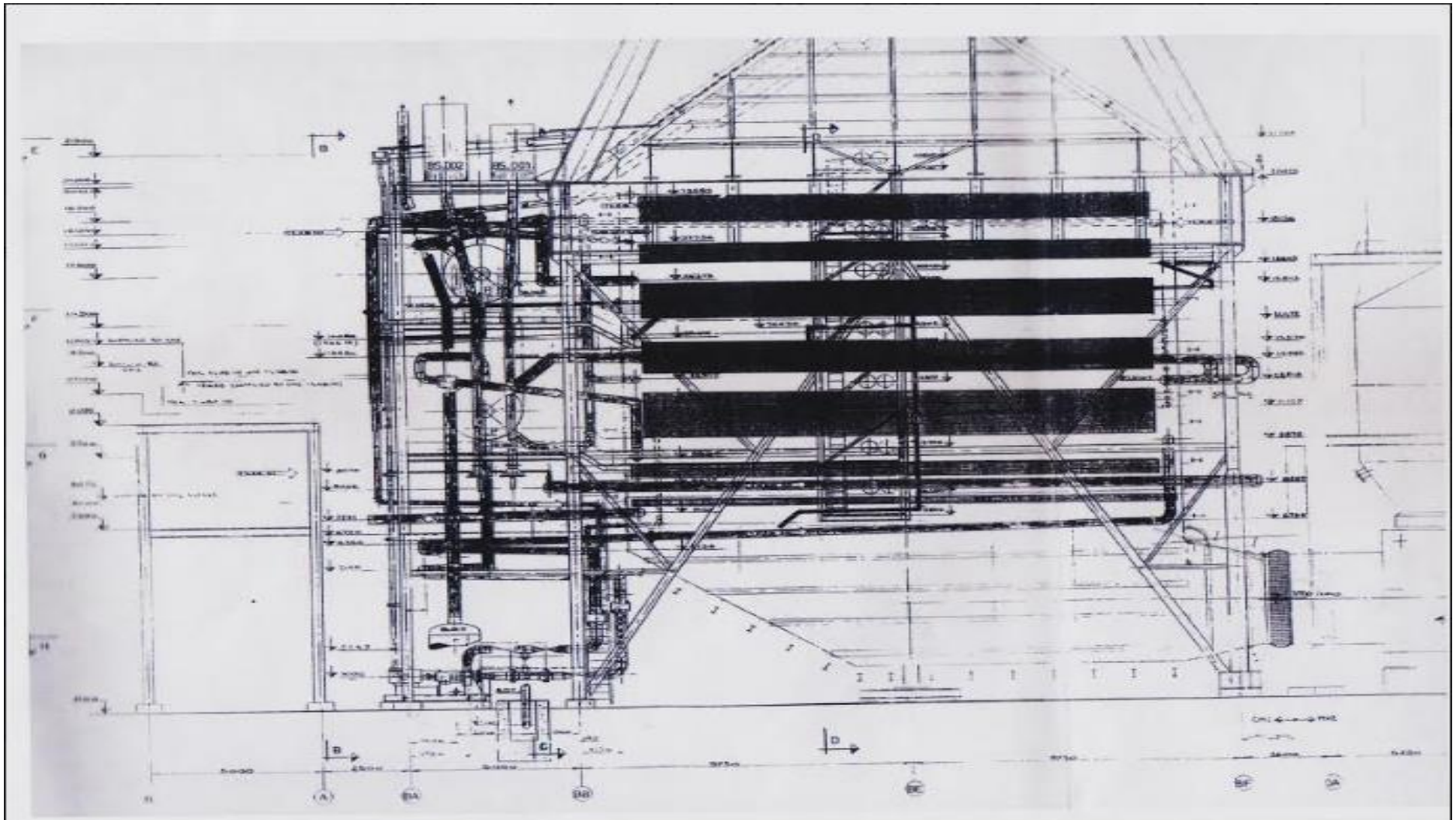
- Asrori Miftakhul, 2016. Analisis Efisiensi *Heat Recovery Steam Generator* (HRSG) PLTGU PT. PJB UP Gresik. Institute Teknologi Sepuluh Nopember.
- Hyuntae Shin, 2012. *Investigation of the Flow Pattern in a Complex Inlet Duct of Heat Recovery Steam Generator*. Power Plant Engineering, South Korea
- Lee, B. E , Kwon, S. B. , Lee, C. S. *On the Effect of Swirl Flow of Gas Turbine Exhaust Gas in an Inlet Duct of Heat Recovery Steam Generator*. Transactions of the ASME, Vol.124, pp. 496–502.
- Hegde, N , Han, I , Lee, T.W , Roy, R.P. *Flow and Heat Transfer in Heat Recovery Steam Generators*. Transactions of the ASME, Vol. 129, pp. 232–242.
- Veera V, 2005. *Modeling of Heat Recovery Steam Generator and its Components Using Fluent*, University of Kentucky
- Shin H, dkk. (2012). *Investigation of the Flow Pattern in a Complex Inlet Duct of a Heat Recovery Steam Generator*, 3R & D Center, SeenTec Co., Ltd., Changwon, South Korea, 641-969
- Suryananda Dhika,dkk (2012). Studi numerik karakteristik aliran dan perpindahan panas pada *Heat Recovery SteamGenerator* di PT Gresik Gases and PowerIndonesia (Linde Indonesia). Institute Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya
- Kusuma, dkk (2014). Studi Numerik VariasiInlet Duct Pada Heat Recovery Steam Generator.Institute Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya
- Incropera, Frank P. and Dewitt, David P. 1998. *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, Fifth Edition. College of Engineering University of Notre Dame : John Wiley and Sons.
- Kaviany, M. 1994. *Principles of Heat Transfer in Porous media*, Second Edition.New York : Springer.

- Anderson, John D. 1995. *Computational Fluid Dynamics*. United States of America: McGraw-Hill, Inc.
- Nusantara Galang, 2014. Studi Numerik Karakteristik Aliran dan Perpindahan Panas Pada Heat Recovery Steam Generator PLTGU Block 3 di PT PJB Unit Pembangkit Gresik dengan Variasi Sudut Buka Diverter Damper (45%, 80% dan Fully open)

LAMPIRAN



Gambar 1 Data lapangan temperatur HRSG PT PJB Unit
Pembangkitan Gresik



Gambar 2. Susunan tube *heat exchanger* PT PJB UP Gresik



BIODATA PENULIS

Nama lengkap penulis Jessie Irmayanti yang dilahirkan di Kota Surabaya pada tanggal 15 Agustus 1994 dari ayah bernama Ermanto Prijodi dan ibu bernama Martilah. Penulis merupakan anak sulung dari tiga bersaudara. Saat ini penulis tinggal di Jalan Manukan Madya no 145 Surabaya. Pada tahun 2006, penulis menyelesaikan pendidikan tingkat dasar di SDN Manukan Wetan no 114 Surabaya. Pada tahun 2009 penulis menyelesaikan pendidikan tingkat menengah di SMPN 26 Surabaya. Tahun 2012 berhasil menyelesaikan pendidikan tingkat menengah atas di SMAN 12 Surabaya. Pada tahun 2015 penulis menyelesaikan gelar ahli madya di Program Studi DIII-Metrologi dan Instrumentasi, Jurusan Teknik Fisika Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya. Kemudian pada tahun 2017 Penulis mampu menyelesaikan program studi lintas jalur S-1 Teknik fisika ITS dan berhasil menyelesaikan Tugas Akhir dengan judul **“STUDI NUMERIK VARIASI SUDUT INLET DUCT TERHADAP KARAKTERISTIK ALIRAN DAN PERPINDAHAN PANAS PADA *HEAT RECOVERY STEAM GENERATOR* TIPE VERTIKAL MENGGUNAKAN METODE KOMPUTASI DINAMIKA FLUIDA DI PT. PJB UP GRESIK ”**. Bagi pembaca yang memiliki kritik, saran, atau ingin berdiskusi lebih lanjut mengenai Tugas Akhir ini maka dapat menghubungi penulis melalui email jessieirma@gmail.com.